

长江漫滩上软下硬地层条件下抗拔桩自平衡法静载试验研究

尹春海 郭志杰 李 强

中铁十五局集团地下工程有限公司, 江苏 扬州市 211400

[摘要]长江漫滩地层上部为淤泥质软土、下部为泥岩,属典型的上软下硬地层,堆载法、锚桩法等常规抗拔静载试验在场地、工期和费用上均受到制约。依托某地铁万年路站抗拔桩检测工程,对两根直径1m的C35钻孔灌注桩(GGZ26、GGZ41)开展自平衡法静载试验,按《基桩自平衡法静载试验技术规程》(DB32/T 3917—2020)采用慢速维持荷载法逐级加卸载,实测上、下段桩的荷载-位移(Q-s)曲线和位移-时间对数(s-lgt)曲线,经等效转换评价单桩竖向抗拔承载力。结果表明,整个加载过程中两根试桩状态稳定,未出现结构损伤或异常变形;GGZ26、GGZ41的竖向抗拔极限承载力分别为1450kN、1350kN,对应的单桩竖向抗拔承载力特征值分别为725kN、675kN,均满足设计要求;Q-s曲线平缓,s-lgt曲线各级线形规则,等效转换结果与桩顶一次加载的受力状态吻合较好。自平衡法在该类地层中测试结果可靠、占地小、费用低,可为同类漫滩上软下硬地层抗拔桩的设计与检测提供参考。

[关键词]自平衡法;抗拔桩;承载力;静载试验;上软下硬地层

DOI: 10.33142/ect.v4i9.20480

中图分类号: TU473

文献标识码: A

Study on Static Load Test of Anti Pull Pile Self Balancing Method under Soft and Hard Strata Conditions on the Yangtze River Floodplain

YIN Chunhai, GUO Zhijie, LI Qiang

China Railway 15th Bureau Underground Engineering Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu, 211400, China

Abstract: The upper part of the Yangtze River floodplain is composed of silty soft soil and the lower part is composed of mudstone, which is a typical upper soft and lower hard stratum. Conventional anti pull static load tests such as pile loading method and anchor pile method are limited in terms of site, construction period, and cost. Based on the anti pull pile testing project at Wannian Road Station of a certain subway, a self balancing static load test was conducted on two C35 bored piles (GGZ26, GGZ41) with a diameter of 1 m. According to the "Technical Specification for Self Balancing Static Load Test of Foundation Piles" (DB32/T 3917-2020), the slow maintenance load method was used to gradually load and unload. The load displacement (Q-s) curve and displacement time logarithm (s-lgt) curve of the upper and lower sections of the piles were measured, and the vertical anti pull bearing capacity of a single pile was evaluated through equivalent conversion. The results indicate that the two test piles remained stable throughout the entire loading process, without any structural damage or abnormal deformation; The vertical ultimate tensile bearing capacities of GGZ26 and GGZ41 are 1,450 kN and 1,350 kN respectively, and the corresponding characteristic values of single pile vertical tensile bearing capacity are 725 kN and 675 kN, both of which meet the design requirements; The Q-s curve is gentle, while the s-lgt curve has regular linearity at all levels. The equivalent transformation results are in good agreement with the stress state of the pile top under a single loading. The self balancing method has reliable test results, small footprint, and low cost in this type of formation, and can provide reference for the design and testing of anti pull piles in soft and hard formations on similar floodplains.

Keywords: self balancing method; anti pull pile; carrying capacity; static load test; upper soft and lower hard strata

引言

随着城市地下空间开发规模的扩大,抗拔桩已成为深基坑工程^[1]、地下综合管廊及轨道交通车站^[2]等结构抗浮设计的主要受力构件^[3],其单桩竖向抗拔承载力一般需通

过静载试验检验^[4]。长江漫滩场地表层广泛分布淤泥质黏性土,地下水位高,周边多为道路、农田和水塘;堆载法需搭设大面积堆载平台并运输大量配重,锚桩法需设置锚桩和反力架,两类方法均存在运输不便、试验周期长、费

用高等问题，在漫滩软土地实施难度尤为突出^[5]。

自平衡法在桩身预埋荷载箱^[6]，加载时上、下两段桩的侧阻力（及下段桩端阻力）互为反力，无需堆载平台和锚固体系，占地小、周期短，适用于场地受限、地下水位较高的复杂地质条件^[7]。该方法在抗压桩检测中应用已较为成熟，但用于上软下硬地层中的抗拔桩时，荷载箱埋设位置（平衡点）的确定、软硬界面附近的桩土相互作用以及试验结果的等效转换，实测资料仍较少。为此，本文以长江漫滩地区某地铁车站抗拔桩为对象开展自平衡法静载试验，报道试验方案与实测结果，分析该类地层中抗拔桩的承载特性，供同类工程参考。

1 工程概况

万年路站位于万年南路与前进西路交叉路口，沿万年

南路南北向敷设，小里程端为大盾构接收井，大里程端为小盾构始发井。

车站为地下三层侧式车站，单柱双跨箱型框架结构，纵向柱距 9m，采用明挖顺作法施工；有效站台宽度 7.8~10.2m，总长 186.6m，标准段宽 32.4m，顶板覆土厚度约 3m，标准段底板埋深约 24.5m，小、大里程端头井底板埋深分别约为 30m 和 26.3m。全站共设 4 个出入口、2 组风亭和 1 个非付费区通道，平面布置见图 1。

站址属长江漫滩平原区，地势平坦，地面高程 4.20~6.00m，近地表为全新统（Q4）黏性土和淤泥质黏性土；周边以道路、农田和水沟为主，水沟水深 0.50~0.70m，沟底淤泥厚 0.30~0.50m。



图 1 地铁车站平面图

场地地基土自上而下主要为①-1 杂填土、②-2b3-4 淤泥质粉质黏土、②-3b2 粉质黏土、④-1b1 粉质黏土，中部夹粉砂与粉土互层及圆砾，下伏 K2c-2n 强风化泥岩和 K2c-3n 中等风化泥岩，代表性土层的物理力学指标见表 1。

表 1 土层物理力学性能指标

土 名	f_{ak} (kPa)	钻孔灌注桩	
		q_{sik} (kPa)	q_{pk} (kPa)
粉质黏土	123	40	/
淤泥质粉质黏土	77	25	/
粉砂与粉土互层	109	24	/
粉质黏土	97	30	/
粉质黏土	159	50	500
粉质黏土	110	80	800
圆砾	140	90	1000
强风化泥岩	160	120	1300
中等风化泥岩	/	170	2000

2 抗拔桩自平衡法试验

2.1 试验原理及设备布置

自平衡静载试验是在钢筋笼制作时将荷载箱与主筋焊接、随笼下放，将荷载箱预埋于桩身设定位置的一种静载试验方法。试验时，高压油泵通过油管向荷载箱内腔逐级加压，箱体顶开，推动上段桩向上位移、下段桩向下位移，上段桩侧阻力（及桩身自重）与下段桩侧阻力、桩端阻力互为反力，无需另设堆载平台或锚固反力体系。

试验中通过位移杆及护管将测点引至桩顶，用电子位移传感器分别量测荷载箱处上、下段桩的向上、向下位移，获得上、下两段桩的荷载—位移（Q-s）曲线，据此确定各段桩的承载力；桩身埋设钢筋计、应变计等量测元件时，还可分离各土层的侧阻力和桩端阻力。将上、下两段桩的试验结果按规程给出的等效转换方法换算，可得到桩顶一次加载的荷载—位移曲线。

试验设备分两类：①加载设备，包括荷载箱、高压油泵及油管护管；②位移量测装置，包括电子位移传感器、位移杆及护管和 JCQ-503B 型桩基静载荷测试仪。设备连接见图 2。

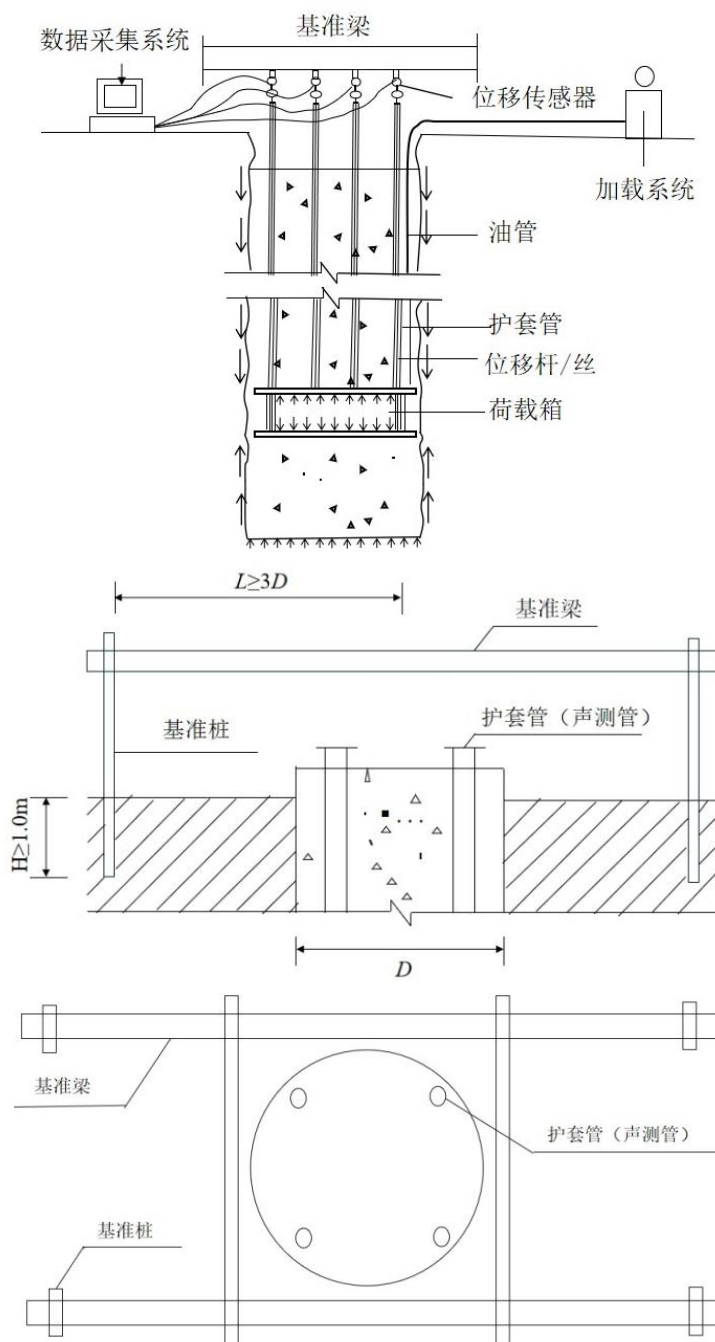


图 2 自平衡静载试验系统装置图

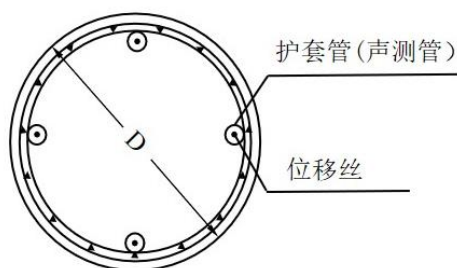
2.2 试桩选取及测点布置

选取 GGZ26、GGZ41 两根直径 1m 的钻孔灌注桩作为试桩，桩身混凝土强度等级为 C35，荷载箱埋设于距桩端 0.5m 处，试桩技术参数见表 2。

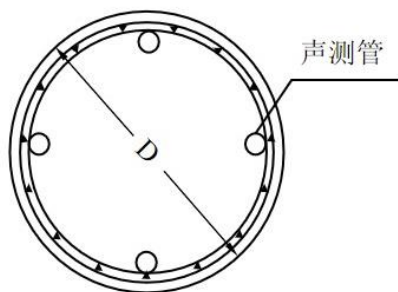
表 2 试桩技术参数

桩号	桩顶标高 (m)	桩底标高 (m)	桩长 L (m)	桩端持力层
GGZ26	-24.25	-38.25	14.0	中风化泥岩
GGZ41	-20.85	-31.85	11.0	强风化泥岩

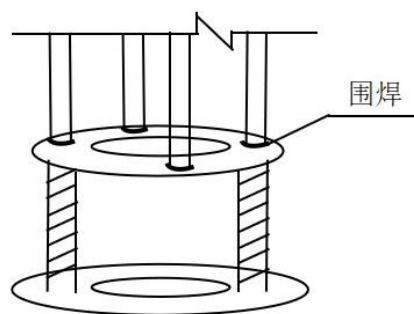
桩身截面测点布置如图 3 所示。



(a) 荷载箱以上桩身截面测点布置



(b) 荷载箱以下桩身截面测点布置



(c) 荷载箱与护套管 (声测管) 焊接

图3 桩身截面测点布置图

2.3 试验加载方法

试验依据《基桩自平衡法静载试验技术规程》(DB32/T 3917—2020)^[8]采用慢速维持荷载法,两根试桩均分 10 级加载、5 级卸载,分级加卸载及对应油压见表 3,其中“2×”表示荷载箱上、下双向同步出力,第 11~15 级为卸载级。

表 3 各试桩分级加卸载一览表

GGZ26			GGZ41		
级数	荷载 (kN)	油压 (MPa)	级数	荷载 (kN)	油压 (MPa)
预加载	2×145	4.20	预加载	2×135	3.91
2	2×290	8.39	2	2×270	7.81
3	2×435	12.59	3	2×405	11.72
4	2×580	16.78	4	2×540	15.62
5	2×725	20.98	5	2×675	19.53
6	2×870	25.18	6	2×810	23.43
7	2×1015	29.37	7	2×945	27.34
8	2×1160	33.57	8	2×1080	31.24
9	2×1305	37.76	9	2×1215	35.15
10	2×1450	41.96	10	2×1350	39.05
11	2×1160	33.57	11	2×1080	31.24
12	2×870	25.18	12	2×810	23.43
13	2×580	16.78	13	2×540	15.62
14	2×290	8.39	14	2×270	7.81
15	0	0	15	0	0

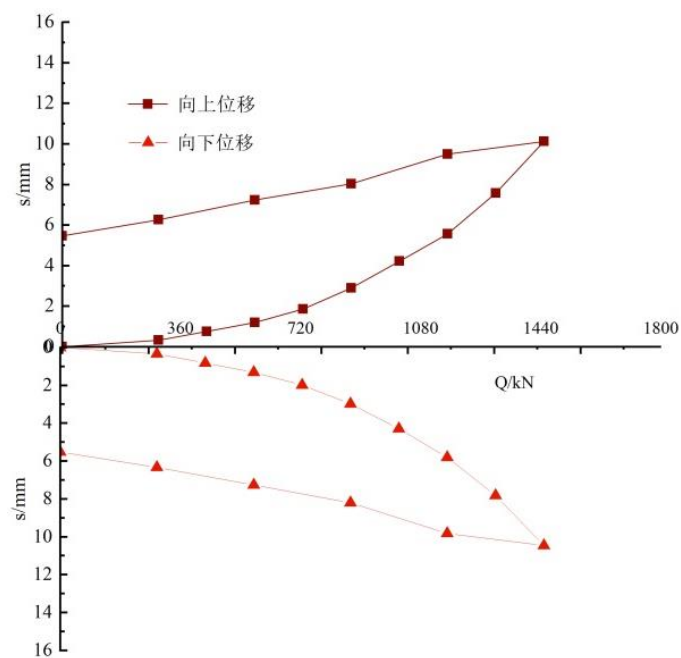
每级荷载施加后,分别于第 5、15、30、45、60min 测读位移,其后每隔 30min 测读一次;当位移变化速率达到相对稳定标准后,方可施加下一级荷载。卸载至零后测读残余位移,维持时间不少于 3h,测读时间为第 15、30min 及以后每隔 30min 一次。

3 试验结果分析

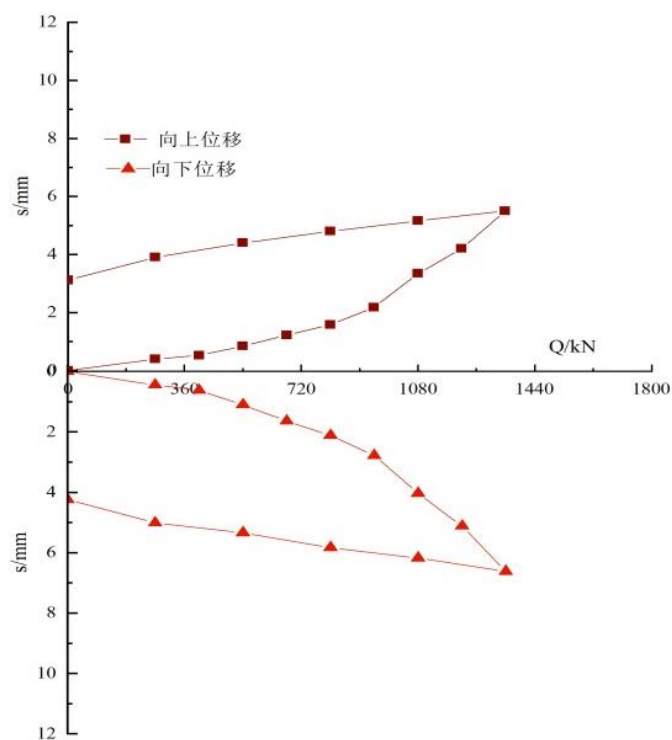
GGZ26、GGZ41 两根试桩的静载试验检测结果见表 4,各级荷载下的荷载-位移 (Q-s) 曲线见图 4,位移-时间对数 (s-lgt) 曲线见图 5。

表 4 自平衡法静载试验承载力检测结果

桩号	荷载箱向上位移 /mm	荷载箱向下位移 /mm	试验最大荷载 /kN	加载时长 /min	抗拔极限承载力 /kN	单桩竖向抗拔承载力 特征值/kN
GGZ26	10.12	10.46	2×1450	1500	1450	725
GGZ41	5.50	6.62	2×1350	1500	1350	675



(a) GGZ26 试桩

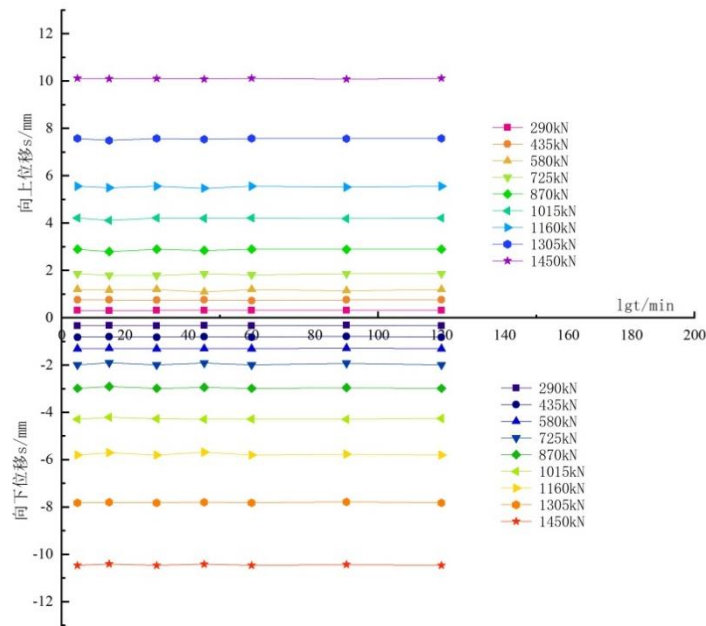


(b) GGZ41 试桩

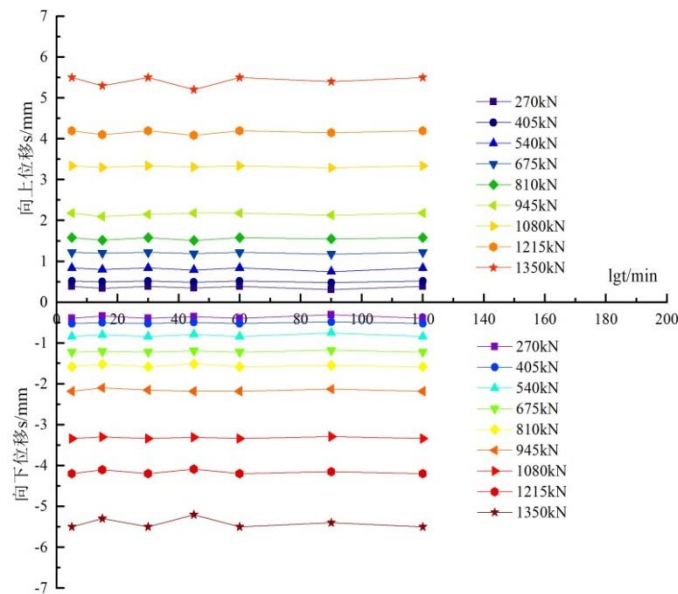
图 4 各试桩荷载—位移 (Q-s) 曲线

由表 4 可知,两根试桩的抗拔极限承载力均满足设计要求: GGZ26 为 1450kN, GGZ41 为 1350kN, 按安全系数 2 换算, 对应的单桩竖向抗拔承载力特征值分别为 725kN 和 675kN。整个加载过程中两桩状态稳定, Q-s 曲线无陡升、陡降段; 由图 5 可见, s-lgt 曲线各级线形接近平行、排列规则, 各级荷载下位移随时间增长缓慢, 未出现突变, 表明桩土体系始终处于稳定工作状态。加载至最大试验荷载时, GGZ26、GGZ41 的荷载箱向上位移分别为 10.12mm 和 5.62mm, 向下位移分别为 10.46mm 和

6.62mm, 位移量级均处于正常范围。相同荷载等级下 GGZ26 的位移大于 GGZ41, 与两桩桩身穿越土层组合、桩端持力层 (GGZ26 为中风化泥岩, GGZ41 为强风化泥岩) 及桩长 (14.0m 与 11.0m) 的差异有关。将上、下段桩的试验结果按规程等效转换后, 桩顶荷载-位移曲线形态平滑、无异常拐点, 与桩顶一次加载的受力状态吻合较好, 说明自平衡法能够可靠反映上软下硬地层中抗拔桩的承载特性。



(a) GGZ26 试桩



(b) GGZ41 试桩

图 5 各试桩位移-时间对数 (s-lgt) 曲线

综合以上实测结果,两根试桩的 $s-lgt$ 曲线平稳规则, $Q-s$ 曲线无破坏征兆,试验结果符合 DB32/T 3917—2020 的判定要求;采用自平衡法在较短时间内即完成了桩基抗拔承载力测定,两桩均满足抗拔设计标准。

4 结语

本文依托长江漫滩上软下硬地层中的地铁车站抗拔桩检测工程,对两根直径 1m 的钻孔灌注桩开展自平衡法静载试验,主要结论如下:

(1) 两根试桩加载至预定最大荷载 ($2 \times 1450\text{kN}$ 、 $2 \times 1350\text{kN}$) 均未出现破坏征兆, $Q-s$ 曲线平缓、 $s-lgt$ 曲线排列规则,试验全过程桩身无结构损伤和异常变形,试桩处于正常工作状态。

(2) GGZ26、GGZ41 的竖向抗拔极限承载力分别为 1450kN 、 1350kN ,对应的单桩竖向抗拔承载力特征值分别为 725kN 、 675kN ,均满足设计要求。

(3) 与堆载法、锚桩法相比,自平衡法无需堆载平台与锚固反力装置,占地小、工期短,试验在漫滩软土地顺利实施,表明该方法适用于上软下硬地层的抗拔桩承载力检测。

本工程的试验方案与实测数据,可为同类长江漫滩上软下硬地层中抗拔桩的设计优化、检测方案制定及承载力取值提供参考。

[参考文献]

- [1]张亦才,黄铸豪.自平衡法在基坑工程抗拔承载力检测中的应用[J].广东土木与建筑,2018,25(7):73-75.
 - [2]黄日忠.基桩抗拔自平衡法静载检测在城市轨道交通工程中的应用[J].江西建材,2019(8):25-26.
 - [3]汪佐,郑伟国,覃建华,等.缓粘结预应力大直径灌注抗拔桩在地下室抗浮设计中的应用[J].广东土木与建筑,2025,32(3):37-42.
 - [4]袁畅,吴耀钦,杨霖,等.桩基传统竖向抗拔静载试验与自平衡静载试验的对比分析[J].西部探矿工程,2025,37(3):8-11.
 - [5]王恭兴.抗拔桩承载力自平衡试验研究[J].中国建设信息化,2020(17):70-71.
 - [6]肖萌,王幸友,牙政锐,等.自平衡荷载箱桩基承载力检测技术[J].工程与建设,2025,39(1):144-147.
 - [7]龚维明,戴国亮.桩承载力自平衡测试技术研究与应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
 - [8]江苏省市场监督管理局,江苏省住房和城乡建设厅.DB32/T 3917—2020 基桩自平衡法静载试验技术规程[S].南京:人民交通出版社,2020.
- 作者简介:尹春海(1988—),男,河北张家口人,工程师,毕业于中国农业大学工程管理专业,现就职于中铁十五局集团地下工程有限公司,从事地铁车站、盾构施工,市域郊铁路建设工程管理工作。