

Study on Self-Balance Test of Pile Foundation and Force Characteristics of Piles in Highway Reconstruction Engineering

Fanglong Hu¹, Qing Zhang², Xianqi He³

¹Geotechnical Engineering Investigation and Design Institute of Hunan Nuclear Industry, Changsha Hunan

²Hunan Province Lou Yi Expressway Construction Development Co. Ltd., Yiyang Hunan

³Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Changsha Hunan

Email: 358416909@qq.com

Received: Mar. 10th, 2018; accepted: Mar. 21st, 2018; published: Mar. 29th, 2018

Abstract

Compared with the traditional pile loading method or pile method, self-balancing method can save time and effort. It has the characteristics of safety, environmental protection, less occupied space, and a wide range of applications. Especially for large diameter and large tonnage piles, which is difficult and unsafe to test the pile with traditional static load test, the bearing capacity data obtained is not accurate enough, and the bearing capacity is wasted. In this case, the advantage of self-balancing method will be more obvious. Based on the reconstruction project of Changsha Lituo section of the Beijing-Hong Kong-Macao expressway, self-balanced method is used to test the pile axial force and lateral friction force of the large tonnage pile, which can determine the actual bearing capacity and test the difference of the measured friction force and side friction resistance in survey, and judge the bearing capacity of pile under the same geological condition.

Keywords

Self-Balancing, Side Friction, Pile Foundation, Axial Force of Pile

高速公路改建工程桩基自平衡试验及桩的受力特性研究

胡芳龙¹, 张清², 何现启³

¹湖南核工业岩土工程勘察设计研究院, 湖南 长沙

²湖南省益娄高速公路建设开发有限公司, 湖南 益阳

³湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙

Email: 358416909@qq.com

收稿日期: 2018年3月10日; 录用日期: 2018年3月21日; 发布日期: 2018年3月29日

摘要

相对于传统的堆载法或锚桩法, 自平衡法具有省时、省力、安全、环保、占用场地少, 适用范围广的特点。特别是对大直径、大吨位桩试桩, 采用传统静载试验时试桩难度大, 且不安全, 得到的承载力数据也不够准确, 造成承载力的浪费, 在这种情况下, 自平衡的优势也就更加的明显。本文以京港澳高速公路长沙段黎托段改造工程为基础, 采用自平衡法测试大吨位桩的桩身轴力及侧摩阻力, 既可确定实际承载力, 又能测试桩的实测摩阻力与勘察所取侧摩阻力的差异, 判断同一地质条件下桩基的承载性能。

关键词

自平衡, 侧摩阻力, 桩基, 桩身轴力

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

京港澳高速公路长沙黎托段改造工程地质条件复杂, 为确保工程安全验证设计参数, 需对桩基进行荷载试验。由于加载荷载较大, 本次试验采用自平衡法, 为研究自平衡试验条件下桩的受力特性, 需进行桩侧摩阻力测试试验, 既可确定实际承载力, 又能测试桩的实测摩阻力与设计所取侧摩阻力的差异, 判断同一地质条件下桩基的承载性能。

本次检测的试桩参数见表 1。

Table 1. The main parameter of test pile

表 1. 主要试桩参数表

试桩编号	2084#-3
桩径(m)	0.90
实测桩长(m)	22.5
成孔方法	旋挖
混凝土强度等级	C35
成桩日期	2015.08.27
单桩竖向抗压极限承载力(kN)	12,000
单桩竖向抗拔极限承载力(kN)	4500
荷载箱埋设位置	桩端向上 1 m
最大试验荷载(kN)	12,000
测试日期	2015.09.20
备注	工程桩

2. 概况

2.1. 工程概况

京港澳高速公路长沙黎托段改造工程起于京港澳高速公路雨花互通南侧约 300 m, K1501 + 390 处, 依次下穿长沙市劳动东路、曲塘路、杜花路、香樟路, 止于香樟路南侧约 1300 m 京港澳高速公路 K1505 + 099.354 处, 路线全长 3.709 km, 其中全、半敞开式及全封闭段 2.24 km。

2.2. 工程地质条件

检测场地地层按地质年代、成因类型、土层结构及其性状特征进行岩土层划分, 主要有第四系全新统桔子洲组(Q_4^{al}): 人工填土、种植土、淤泥(淤泥质土)及坡积层; 上更新统白水江组(Q_3^{bs})、中更新统新开铺组(Q_2^s)冲洪积层; 残积层; 基岩为内陆湖相沉积的第三系(E)枣市组碎屑岩: 泥质粉砂岩、砾岩。

本场地地下伏基岩为厚度巨大的第三系泥质粉砂岩及砾岩, 含水微弱, 属隔水边界。长沙地区第四系沉积物的分布受近期构造运动控制, 中晚更新世时期曾因河流泛滥形成本地区老粘性土, 后经浏阳河下切侵蚀作用使河床逐渐固定下来, 全新世时期堆积厚达数米的全新统冲积层。冲积层具有二元结构, 上部为粘性土, 为相对隔水顶板, 下部中密-密实状的砂砾石, 为含水层, 赋存有孔隙水, 中上更新统的老粘性土为隔水边界。本场地地下水的补给来源、补给边界主要有两种: 一是 II 级阶地的广大地面, 接受充沛的大气降水补给; 二是场地周边 II 级阶地地下水的侧向渗透, 河水与冲积层地下水之间存在补给关系。

3. 设备及元器件埋设

3.1. 平衡点计算及荷载箱埋设

由于桩基的承载力设计值较大(12,000 kN), 试验采用自平衡法进行检测。平衡点计算时, 平衡点以上摩阻力系数取勘察确定值得 0.7 倍, 平衡点以下取 1.0。平衡点以上受力包括上段桩侧摩阻力及桩的自重, 平衡点以下受力包括下段桩的侧摩阻力及端阻力。计算的平衡点位置为标高-23.5 m 处(桩顶标高为-2.0 m, 桩底-24.5 m)荷载箱为在国内具有专利技术的腔式荷载盒, 直径同钢筋笼外径, 高约 20 cm, 行程 15 cm, 荷载箱的形状(图 1)、布局形式等参数, 充分考虑灌注混凝土、注浆、声测等任务预留实施空间。

3.2. 钢筋计的埋设

每个断面安装 3 个钢筋计, 埋设在不同性质土层的界面处, 以测量桩在不同土层中的分层摩擦力。



Figure 1. The annular load-boxes
图 1. 环形荷载箱

Table 2. Position table of embedded Steel stress gauge of 2084#-3 pile
表 2. 2084#-3 桩埋设钢筋应力计的位置表

部位	断面 1	断面 2	断面 3	断面 4
高程(m)	-7.5	-12.5	-17.5	-22.5

注：共埋设 4 个断面，桩顶标高为-2.0 m，桩底-24.5 m。

从桩底起算，各桩埋设钢筋应力计的位置见表 2。

4. 现场检测

4.1. 检测设备

1) 自平衡静载测试分析仪

试验过程由 JCQ-503A 自平衡静载测试分析仪根据人工设置自动控制，通过压力传感器与位移传感器自动数据采集、记录和存储。记录内容包括：油压，荷载箱上部位移，荷载箱下部位移，桩顶位移等。

2) 位移量测装置

位移杆采用内杆加外套护管的方式，两上位移杆焊接在荷载箱上盖板，两下位移杆焊接在预留好的下位移连接处，采用丝扣连接，呈 90°分布，拧紧时需缠生料带，顺着钢筋笼连接至地面。位移值由位移传感器进行测量，其读数精确到 0.01 mm。位移传感器采用磁性表座固定于基准梁上，基准梁采用工字钢。基准梁支点与试桩中心的距离为该试桩 3 倍桩径。

先进的位移传感器固定结构的设计和安装，在原理上保证了位移测量值只受桩体位移和基准梁的影响。

3) 应力数据测读

本次数据采集点较多，因而配了 JMZX-32A32 通道采集模块可同时采集 32 个通道的数据，提高了检测效率，增加了可靠性。

1、在静荷载试验加载以前，先用频率采集仪测各应变计的初始频率模数；

2、在施加每级荷载，位移速率达到相对稳定标准后测读各钢筋应力计的频率模数。

3、应变数据测读：用频率采集仪测读各种荷载下的钢筋应力计频率模数，换算出桩身混凝土的应变值。

4.2. 加载试验

根据《基桩静载试验自平衡法》JT/T 738-2009 的要求，加载分 10 级进行，每级加载量为最大加载量的 1/10，第一级按两倍分级荷载加载。

加载分级按预定值 6000 kN 来分级，分成 10 级，每级加载值为 600 kN，首级加载按两倍荷载即 1200 kN 加载。

5. 数据分析与结果

5.1. 等效转换曲线

根据《基桩静载试验自平衡法》JT/T 738-2009 附录 B 的规定，桩身无轴力实测值等效转换方法采用如下公式计算：

桩顶等效荷载 P 为：

$$P = (Q_u - W) / g + Q_t \quad (1)$$

与等效桩顶荷载 P 对应的桩顶位移 s 为：

$$s = s_1 + \Delta s \quad (2)$$

其中上段桩身的弹性压缩量 Δs 为:

$$\Delta s = \frac{[(Q_u - W)/\gamma + 2Q_l]L}{2E_p A_p} \quad (3)$$

式中(下同):

Q_u : 对应上段桩 Q_u-s_u 曲线中位移绝对值等于 s_1 时的荷载(kN);

Q_l : 荷载箱向下荷载(kN), 可直接测定;

s_1 : 荷载箱向下位移, 可直接测定(mm);

W : 试桩荷载箱上部桩自重(kN);

γ : 试桩上部桩土修正系数, 取 0.8。

L : 上段桩长度(m);

E_p : 桩身弹性模量, 取值 3.15×10^4 MPa;

A_p : 桩身截面面积(m²)。

5.2. 单桩竖向抗压极限承载力

实测得到荷载箱上段桩的极限承载力 $Q_{u上}$ 和荷载箱下段桩的极限承载力 $Q_{u下}$, 根据《基桩静载试验自平衡法》JT/T 738-2009 中的承载力计算公式得到单桩竖向抗压极限承载力[1] [2] [3] [4] [5]:

$$P_u = \frac{Q_{u上} - W}{\gamma} + Q_{u下} \quad (4)$$

式中:

P_u : 试桩单桩竖向抗压极限承载力(kN);

$Q_{u上}$: 试桩上段桩的极限加载值(kN);

$Q_{u下}$: 试桩下段桩的极限加载值(kN);

W : 试桩上段桩的自重(kN)。

5.3. 桩身轴力测试分析

桩身轴力计算步骤如下[6] [7] [8] [9] [10]:

1) 由下列公式计算出各级荷载下桩身混凝土的轴力, 进而计算得各截面的桩身轴力。

$$P_h = A_h \cdot E_h \cdot \varepsilon_h \quad (5)$$

$$\varepsilon_h = \varepsilon_s \quad (6)$$

A_h —混凝土的截面积(m²)

E_h —混凝土的弹性模量(MPa)

ε_h —试桩混凝土应变变量

ε_s —钢筋应变变量

2) 由各截面的轴力计算桩侧摩阻力(f_s) [11] [12] [13]:

$$f_s = \frac{\Delta P - W}{A_{侧}} \quad (7)$$

ΔP —相邻截面间的轴力差(kN)

$A_{侧}$ —相邻截面间的侧面积(m²)

W —自重(kN)

5.4. 检测结果

1) 位移及承载力检测成果

根据《基桩静载试验 自平衡法》JT/T 738-2009 中的规定,京港澳高速公路长沙黎托段改造工程基桩自平衡静载试验中:

自平衡静载试验数据汇总见表 3。

自平衡静载试验结果见表 4。

基桩自平衡静载试验桩顶的 $U-\delta$ 、 $\delta-lgt$ 曲线如图 2 所示。

等效转换为桩顶加载的数据转换表及 P-s 曲线分别见表 5 及图 3。

2) 轴力及侧摩阻力测试结果与分析

依据应力采集数据,采用(5)~(7)式计算得到轴力计算及侧摩阻力计算结果如表 6 及图 4 所示。

通过自平衡试验实测的桩顶转换荷载与堆载法所得的轴力分布结果基本一致。虽然试验加载荷载未达到桩的极限荷载,但所测试的桩侧摩阻力值均大于桩侧极限摩阻力标准值,见表 7。

6. 结论

2084#-3 桩上段基桩极限加载值 Q 取最大荷载为 6000 kN,最大位移值为 6.37 mm。下段基桩极限加载值 Q 取最大荷载为 6000 kN,最大位移值为 11.51 mm。等效转换桩顶加载的 P-s 曲线呈陡变型,桩顶等效荷载为 13,073 kN,对应最大桩顶等效位移 21.75 mm。通过计算,得出该桩的单桩竖向抗压极限承

Table 3. Test date summary of self-balanced test of 2084#-3 pile

表 3. 2084#-3 基桩自平衡静载试验数据汇总表

序号	荷载(kN)	向下(mm)		向上(mm)		桩顶(mm)	
		本级	累计	本级	累计	本级	累计
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1	1200	0.43	0.43	0.31	0.31	0.14	0.14
2	1800	0.65	1.08	0.20	0.51	0.11	0.25
3	2400	0.75	1.83	0.32	0.83	0.17	0.42
4	3000	1.12	2.95	0.64	1.47	0.44	0.86
5	3600	0.91	3.86	0.93	2.40	0.76	1.62
6	4200	1.44	5.30	1.16	3.56	1.02	2.64
7	4800	1.66	6.96	0.89	4.45	0.74	3.38
8	5400	2.22	9.18	0.87	5.32	0.76	4.14
9	6000	2.33	11.51	1.05	6.37	0.96	5.10
10	4800	-0.20	11.31	-0.03	6.34	-0.04	5.06
11	3600	-0.27	11.04	-0.08	6.26	-0.05	5.01
12	2400	-0.39	10.65	-0.20	6.06	-0.12	4.89
13	1200	-0.65	10.00	-0.35	5.71	-0.29	4.60
14	0	-1.08	8.92	-0.70	5.01	-0.61	3.99

向下: 最大位移量: 11.51 mm, 最大回弹量: 2.59 mm, 回弹率: 22.5%; 向上: 最大位移量: 6.37 mm, 最大回弹量: 1.36 mm, 回弹率: 21.4%; 桩顶: 最大位移量: 5.10 mm, 最大回弹量: 1.11 mm, 回弹率: 21.8%。

Table 4. Test result of self-balanced test
表 4. 基桩自平衡静载试验结果

试桩编号	极限加载值 $Q_{u上}$ (kN)	极限加载值 $Q_{u下}$ (kN)	向上最大位移 (mm)	向下最大位移 (mm)	抗压极限承载力 (kN)	抗拔极限承载力 (kN)
2084#-3	6000	6000	6.37	11.51	13073	6000

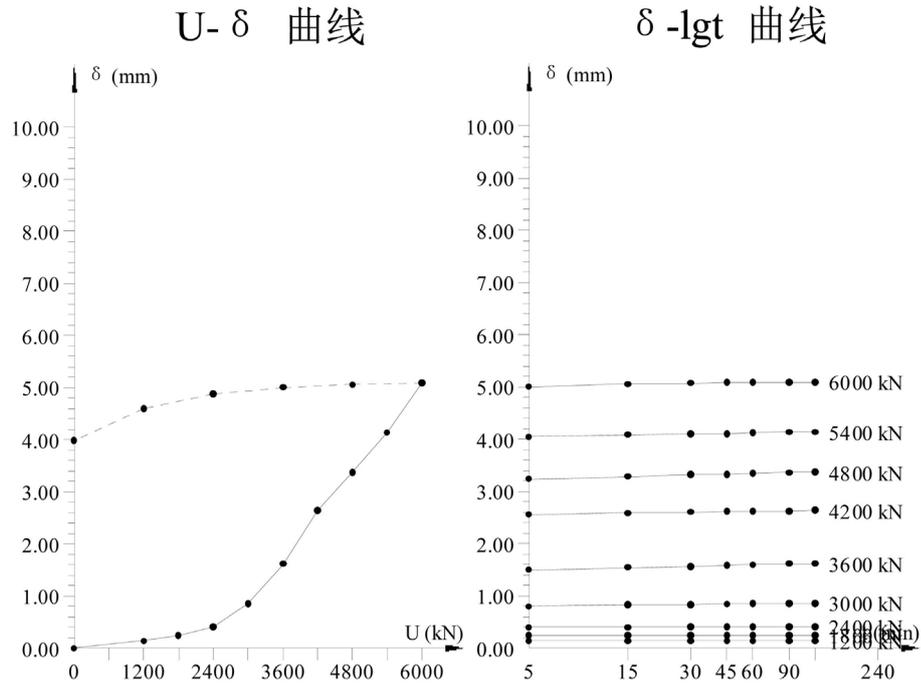


Figure 2. U- δ , δ -lgt curves of self-balanced test for 2084#-3
图 2. 2084#-3 基桩自平衡静载试验桩顶的 U- δ 、 δ -lgt 曲线

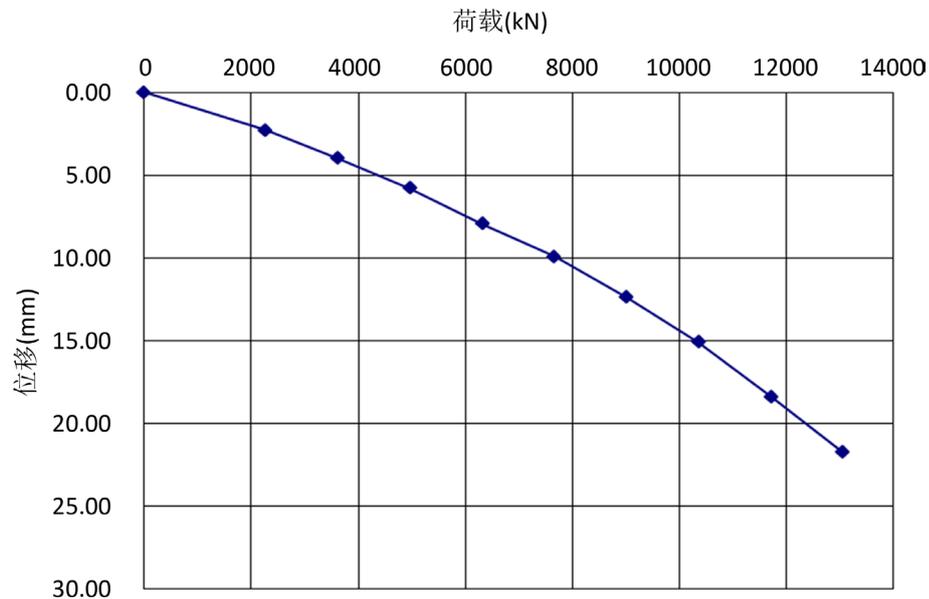


Figure 3. P-s curve of equivalent conversion data which is converted form self-balanced test to top load of 2084#-3
图 3. 2084#-3 基桩静载试验等效转换为桩顶加载的 P-s 曲线

Table 5. Equivalent conversion data which is converted form self-balanced test to top load of 2084#-3
表 5. 2084#-3 基桩自平衡静载试验转换为桩顶加载的等效转换数据表

序号	桩顶等效荷载 P (kN)	桩顶等效荷载对应位移(mm)	备注
0	0	0.00	
1	2273	2.29	
2	3623	3.99	
3	4973	5.79	
4	6323	7.95	
5	7673	9.91	
6	9023	12.40	
7	10,373	15.10	
8	11,723	18.37	
9	13,073	21.75	

Table 6. Data of axial force and Side Friction Resistance of 2084#-3
表 6. 2084#-3 桩身轴力数据表及桩侧摩阻力表

荷载(kN)	荷载箱→断面 4, -23.5~-22.5 m			断面 4→断面 3, -22.5m~-17..5 m			断面 3→断面 2, -17.5 m~-12.5 m			断面 2→断面 1, -12.5 m~-7.5 m		
	轴力 (kN)	轴力差 (kN)	摩阻力 (kPa)	轴力 (kN)	轴力差 (kN)	摩阻力 (kPa)	轴力 (kN)	轴力差 (kN)	摩阻力 (kPa)	轴力 (kN)	轴力差 (kN)	摩阻力 (kPa)
1200	818	382	161.9	78	740	58.4	0	78	0	0	0	0
1800	1377	423	180.1	230	1147	94.4	0	230	13.3	0	0	0
2400	1945	455	194.2	423	1522	127.6	0	423	30.4	0	0	0
3000	2518	482	206.2	714	1804	152.6	0	714	56.1	0	0	0
3600	3095	505	216.3	1069	2026	172.2	80	989	80.5	0	80	0
4200	3677	523	224.3	1498	2179	185.7	206	1292	107.3	0	206	11.2
4800	4262	538	230.9	1982	2280	194.7	473	1509	126.5	0	473	34.8
5400	4855	545	234	2502	2353	201.1	822	1680	141.6	0	822	65.7
6000	5449	551	236.7	3019	2430	207.9	1207	1812	153.3	14	1193	98.5

Table 7. Results of side friction resistance test
表 7. 侧摩阻力测试结果

序号	土(岩)名称	桩侧极限摩阻力标准值 q _{sik} (kPa)	桩侧摩阻力实测值(kPa)
1	粉土	50	98.5
2	卵石	130	153.3
3	粉质黏土	90	207.9
4	强风化泥质粉砂岩	150	236.7

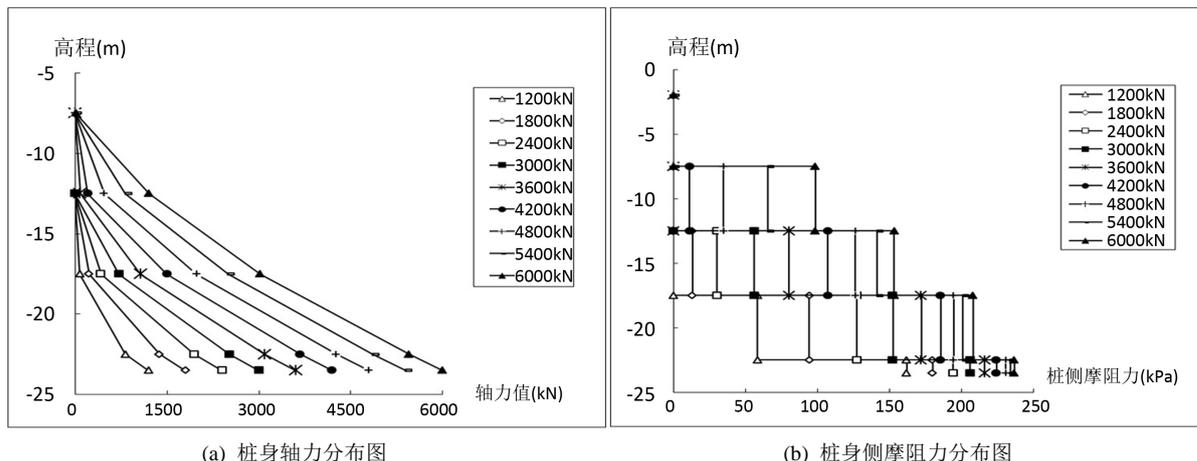


Figure 4. Axial force and side friction resistance map

图 4. 2084#-3 桩身轴力及侧摩阻力分布图

载力为 13,073 kN；单桩竖向抗拔极限承载力为 6000 kN。从荷载与桩身轴力关系可见，荷载箱上下两段桩受竖向荷载后，上段由于受到向上顶力桩身产生向上位移，桩侧受到土的向下摩阻力，下段由于受到向下顶力桩身产生向下位移，桩侧受到土的向上摩阻力，荷载通过发挥出来的摩阻力传递到桩周土层中去，从而使桩身轴力随离开荷载箱越远逐渐递减。从桩侧摩阻力表及桩侧摩阻力-荷载关系曲线可见，随着荷载增加，桩侧摩阻力逐渐发挥。桩端阻力也随着荷载增加而逐渐发挥。试验实测的桩顶转换荷载与堆载法所得的轴力分布结果基本一致，虽然试验加载荷载未达到桩的极限荷载，但所测试的桩侧摩阻力值均大于桩侧极限摩阻力标准值。

参考文献

- [1] 廖海东. 自平衡法在河口黄河大桥单桩承载力测试中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2016(10): 100-103 + 14.
- [2] 吴思雄. 基桩自平衡法承载力检测试验在深基坑中的应用[J]. 福建建设科技, 2016(1): 11-13 + 10.
- [3] 蒋志军, 雷发洪, 张平川. 使用自平衡法测试基桩承载力的几个问题[J]. 四川建筑, 2016, 36(3): 272-273.
- [4] 王公胜. 基桩自平衡法试验中平衡点计算的新思路[J]. 中国建材科技, 2016, 25(3): 87-89 + 115.
- [5] 于天来, 刘锐, 徐京. 自平衡法测试桩基侧摩阻力精度分析[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(3): 112-114.
- [6] 李友好, 郭金星, 张新旺, 梁高云. 自平衡法静压荷载试验应用实践[J]. 公路交通技术, 2003(6): 52-54.
- [7] 马晔, 王陶. 超长钻孔桩自平衡法荷载试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 275-278.
- [8] 徐长节, 李碧青, 蔡袁强. 自平衡法试桩的承载特性试验研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(7): 1262-1268.
- [9] 王博林. 自平衡法桩土荷载传递机理及承载特性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2012.
- [10] 于微微. 自平衡法试桩在实际工程中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [11] 刘锐. 自平衡法测试桩基承载能力可靠性研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015.
- [12] 何现启, 李桂生, 彭凌星, 王焱. 湖南某桥梁冲孔灌注桩侧摩阻力测试研究[J]. 勘察科学技术, 2016(4): 32-36.
- [13] 宇德忠, 程培峰, 季成, 崔志刚. 岛状多年冻土桥梁桩基回冻后桩侧摩阻力的试验研究[J]. 中外公路, 2015(6): 105-109.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org