

声波透射法及自平衡法在超高层嵌岩灌注试桩中的应用分析

李杰¹, 蔡润², 彭涛², 彭界超², 戴国亮³, 王谦^{4,5}, 王涛², 马胜龙²

(1. 中海佳隆成都房地产开发有限公司, 四川 成都 610000; 2. 中冶成都勘察研究总院有限公司, 四川 成都 610023;
3. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 211189; 4. 中国地震局(甘肃省)黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
5. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 桩基承载力的确定会直接影响建筑的整体性安全, 如何确定钻孔灌注桩的承载力是一个复杂的问题。基于中海成都超塔(488.9 m)在建项目试桩工程, 首先采用无损检测技术声波透射法进行了试桩完整性检测; 然后利用自平衡检测法进行了单桩竖向承载力测试。测试结果表明: 桩身混凝土质量均匀, 完整性良好, 3根试桩均为Ⅰ类桩; 3根试桩的极限承载力试验推荐值均不小于29 394 kN, 由等效转换曲线可知, 在极限荷载30 000 kN条件下, 桩顶沉降值最大为20.27 mm, 满足设计要求。研究成果可为同类地区的桩基承载力检测提供参考。

关键词: 钻孔灌注桩; 声波透射法; 桩身完整性; 桩承载力; 自平衡法

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2023)04—0209—09

Application Analysis of Sound Wave Transmission and Self-balancing in Super High-rise Rock-socketed Cast-in-place Piles

LI Jie¹, CAI Run², PENG Tao², PENG Jiechao², DAI Guoliang³, WANG Qian^{4,5},
WANG Tao², MA Shenglong²

(1. China Overseas Jialong Chengdu Real Estate Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China;

2. Chengdu Surveying Geotechnical Research Institute Co., Ltd. of MCC, Chengdu, Sichuan 610023, China;

3. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China; 4. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Administration and Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China;

5. Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Determination of the bearing capacity of the foundation pile will directly affect the overall safety of the building which is a very complex problem. This work is based on the test pile project of the China Overseas Chengdu Super Tower (488.9 meters) which is under construction. Firstly, the integrity of pile foundation was inspected by non-destructive testing technology, sound wave transmission method. Secondly, the vertical bearing capacity test of the single pile is carried out by the self-balance detection method. The test results are as follows. The concrete quality of the pile body is uniform and the integrity is good, the quality grade of the three test piles is Class I. The recommended value of the ultimate bearing capacity of the three test piles is not less than 29 394 kN, it can be seen from the equivalent conversion curve that under the condition of ultimate load of 30 000 kN. The maximum settlement value of pile top is 20.27 mm which could meet the design requirements. The results of this paper can provide a certain reference for the testing of pile foundation bearing capacity in similar areas.

Keywords: bored piles; sound wave transmission; pile bearing capacity; pile integrity; self-balanced method

桩基础因其具有较高承载力而被广泛应用于基建工程的各个领域^[1-5]。单桩竖向极限承载力是反映桩身材料、桩侧土与桩端土性状等性能的综合指标,因而如何确定桩基的竖向极限承载力是桩基施工过程中非常重要的一步^[6-8]。受场地等方面的影响,传统的堆载法所要求的堆载物重量至少为其极限承载力的 1.2 倍,若需要 2 000 t 及以上的荷载时,堆载成为最大的问题,故传统的静载方法难以实施。自平衡检测法以其独特的原理和简单的试验装置设施,能够较好地克服传统承载力检测方法的限制,该方法已逐渐在各类工程中有一定的应用^[9-11]。桩基自平衡承载力检测方法已成为传统静载方法的重要补充^[12]。

目前,国内外已有大量学者针对自平衡检测法在桩基承载力检测中的应用进行研究。如鲍育明等^[13]提出了用荷载相等的原则,将自平衡测试结果转化为常规静载试验结果的处理方法;张广彬等^[14]将自平衡检测有针对性地在吨位静载试验中进行推广应用;张帆等^[15]通过分析超长桩荷载传递机理的某些特征和承载特性,认为桩端压浆可以最大限度地减小施工造成的不利影响,改善超长桩荷载传递性能,大幅提高该类桩承载性能的稳定;欧孝夺等^[16]通过拟合得到各因素与转换系数间的二次项分布关系式及相关系数;朱超等^[17]通过研究大吨位嵌岩桩承载力试验,结果表明自平衡法加载优势较明显;欧孝夺等^[9]提出一种适用于层状地基中单桩承载力自平衡法测试的理论解析转换方法;李家龙等^[18]以虎跳峡金沙江大桥的主墩塔桩为例进行自平衡测试分析;鲍树峰等^[19]利用科威特 Boubyan 岛海港工程公路桥预备桩 OCPPT-01 试桩工程,采用新技术 SoniCaliper 法进行了桩基成孔质量检测;戴国亮等^[20]将自平衡试桩法成功应用于港口码头上试桩工程;戴国亮等^[21]基于试桩的自平衡测试结果,对桩压浆前后的承载力、位移变化情况以及承载特性作了分析。根据现有的研究成果可知,将自平衡法应用于桩基检测是切实可行的。

作者以中海成都超塔项目的试桩承载力检测为例,首先采用声波透射法对试桩的完整性进行检测,然后利用自平衡方法检测桩基在极限承载力作用下的位移变化,最后利用等效转换关系确定出推荐的桩基承载力值。研究成果对软岩地区岩土工程勘察及桩基设计具有一定的参考价值。

1 工程概况

工程项目位于成都天府新区,拟建主楼超塔建

筑高度为 488.9 m,是集商业、办公、酒店、观光于一体的综合性超级摩天大楼,其中地下室 5 层,地上建筑 97 层,该项目基础形式拟采用钻孔灌注桩。

整个项目地形较为平坦,场地不存在影响稳定性的不良地质作用和地质灾害,根据岩土工程勘察成果报告^[22]可知:项目场地地貌单元属宽缓浅丘,为剥蚀型浅丘陵地貌。场地岩土主要由第四系全新统人工填土(Q_4^{ml}):以素填土为主;第四系中更新统冰水沉积层(Q_2^{gl}):以粉质黏土和黏土为主;侏罗系上统蓬莱镇组(J_3p):包括泥岩和砂岩,但以泥岩为主,砂岩主要以透镜体状或层状分布于泥岩中,大部分地段泥岩及砂岩呈互层状分布。基岩宏观上呈现自上而下风化程度逐渐减弱的趋势,按其风化程度的差异分为全风化、强风化、中等风化、微风化等风化带,各风化带之间风化程度往往呈逐渐过渡趋势,其三维地质岩体模型如图 1 所示^[22]。

为了检验工程桩承载力是否满足设计要求,根据检测规范要求^[23]:本工程的设计等级为甲级,地质条件复杂,所以需要试打桩。选择整个场地最具有代表性、场地地质条件较差的三个点位进行试桩试验,以验证设计竖向承载力 14 000 kN。试桩混凝土强度等级为 C50,桩位布置见图 2。

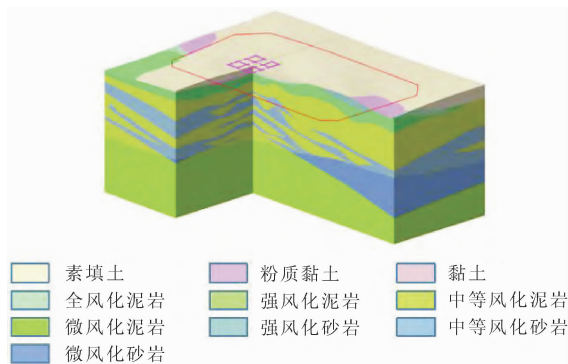


图 1 三维地质岩体模型图

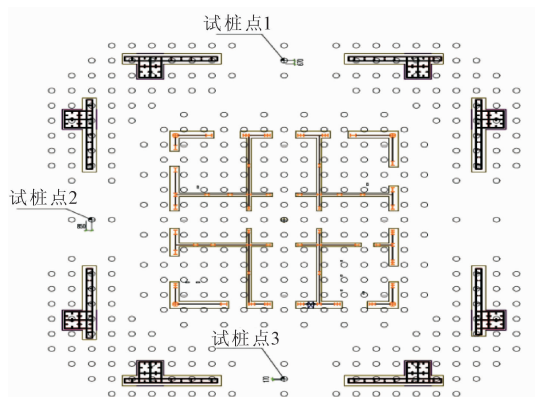


图 2 试桩桩位布置图

2 测试方法

2.1 测试原理

2.1.1 声波透射法

声波透射法,其基本原理是根据声波脉冲波穿越被测混凝土时,声学参数的变化反映缺陷的存在,通过分析这些声学参数的变化来评判桩身的完整性。声波透射法根据两个换能器的相对位置分为平测和斜测两种^[23]。平测时,两个换能器应始终保持相同深度;斜测时,两个换能器应始终保持固定高差,且两个换能器中点连线与水平夹角不应大于 30°,声波透射法检测示意图如图 3 所示^[23],图中 l 表示测管之间的距离, i 表示探头的位置。

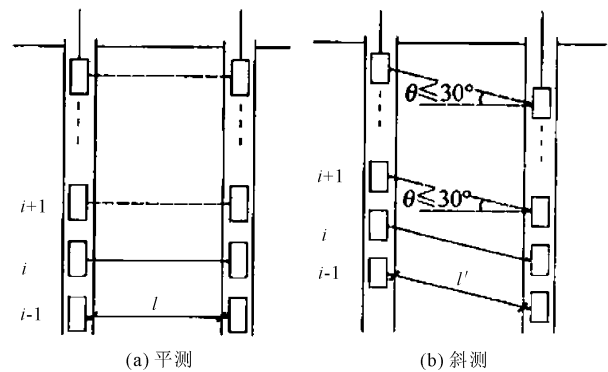


图 3 声波透射法检测示意图

2.1.2 自平衡试验法

自平衡测桩法的主要装置是一种经特别设计可用于加载的荷载箱^[24]。在试验加载过程中,根据规范要求^[24],记录逐级荷载及相应的桩身向上和向下的位移,得到荷载与位移关系曲线,分别测试上段桩、下段桩的极限承载力或桩的极限端阻力,由计算确定单桩竖向抗压极限承载力。试桩的沉降变形,通过对称布置于桩头的位移计测量,所有位移计均用磁性表座固定于基准梁上,基准梁具有一定刚度。自平衡试桩法试验示意图见图 4。

2.2 分析方法

2.2.1 声波透射法

当受检桩的混凝土强度不低于设计强度的 70%,且不低于 15 MPa 时(一般混凝土龄期在 14 d 以上)^[23],方可采用声波透射法进行检测,声测管的埋设数量与受检桩的桩径有关,桩径与声测管数量的对应关系如表 1 所示。

检测数据分析参数主要是由声速和波幅两个指标来判别,指标包括平均值、临界值、标准差、变异系数,计算公式见表 2。

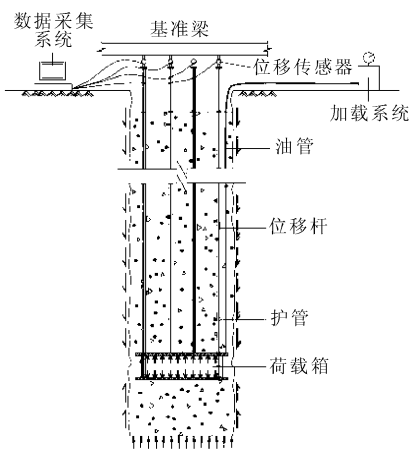


图 4 自平衡试桩法试验示意图

表 1 桩径与声测管数量的对应关系

桩径/mm	声测管数量/根	声测管布置示意图
$D \leq 800$	2	
$800 < D \leq 1600$	3	
$D > 1600$	4	

结合桩身混凝土各声学参数平均值、临界值及实测波形,按表 3 评价桩身完整性^[25]。

2.2.2 自平衡试验法

(1) 荷载分级。每级加载值为极限承载力的 1/10。按 10 级 9 次加载,卸载分级进行,每级卸载量为 2 级加载分级量,具体分级加载见表 4。

(2) 荷载箱位置的确定。根据地勘参数及试桩对应地勘钻孔位置地层情况,依据《建筑基桩自平衡静载试验技术规程》^[24](JGJ/T 403—2017)中相关规定及已有研究成果可知^[26-27]:

侧摩阻力按下式计算:

$$Q_{si} = u_p h_i q_{sia} \tag{1}$$

式中: u_p 为桩身周长, h_i 为土层厚度, q_{sia} 为侧摩阻力特征值。

总的桩侧摩阻力为:

$$Q_s = \sum Q_{si} \tag{2}$$

表 2 评价指标表

指标	声速	波幅
平均值	$v_m(j) = \frac{1}{n-k-k'-1} \sum_{i=k'+1}^{n-k} v_i(j)$	$A_m(j) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_{pj}$
临界值	$v_0(j) = v_m(j) - \lambda \cdot s_x(j)$	$A_c(j) = A_m(j) - 6$
标准差	$s_x(j) = \sqrt{\frac{1}{n-k-k'-1} \sum_{i=k'+1}^{n-k} (v_i(j) - v_m(j))^2}$	
变异系数	$C_v(j) = \frac{s_x(j)}{v_m(j)}$	
异常判断	$v_i(j) \leq v_c$	$A_{pj}(j) < A_c(j)$

说明:λ可由建筑基桩检测技术规范(JGJ 106—2014)中表 10.2.3 查得^[23], v_m 为数据的平均值, v_i 为第*i*点的声速, v_0 为异常判断值, s_x 为数据的标准值, C_v 为变异系数, A_m 为波幅平均值, A_{pj} 为第*j*点的波幅值, A_c 为波幅临界值。

表 3 桩身完整性评价表

类别	分类原则	特 征
I	桩身完整	各检测剖面的声学参数均无异常,无声速低于低限值异常。
II	轻微缺陷,承载力不受影响,能正常使用	某一检测剖面个别测点的声学参数出现异常,无声速低于低限值异常。
III	桩身部有较严重缺陷,影响祉基的承载力,需要处理后方可使用	某一检测剖面连续多个测点的声学的声学参数出现异常;两个或两个以上检测剖面在同一深度测点的声学参数出现异常;局部混凝土声速出现低于低限值异常。
IV	桩力存严缺陷,不能使用,需要报废	某个检测剖面连续多个测点的升序参数出现明显异常;两个或两个以上检测剖面在同一深度测点的升序参数出现明显异常;桩身混凝土声速出现普遍低于低限值异常或无法检测首波或声波接收信号严重畸变。

表 4 荷载分级加载表

阶段	级数	荷载/kN
加载	1	2×1400
	2	2×2800
	3	2×4200
	4	2×5600
	5	2×7000
	6	2×8400
	7	2×9800
	8	2×11200
	9	2×12600
	10	2×15000
卸载	11	2×11200
	12	2×8400
	13	2×5600
	14	2×2800
	15	0

桩端阻力:

$$Q_b = A_p q_{pa} \tag{3}$$

式中: Q_b 为桩端阻力; A_p 为桩端截面积; q_{pa} 为桩端阻力特征值。

依据平衡原理可知:

$$Q_{s上} + G_{上} = Q_{s下} + Q_b \tag{4}$$

式中: $Q_{s上}$ 为荷载箱上部桩自重,由于上段桩受到的负摩阻力,故 $Q_{s上}$ 还要除以折减系数 λ,根据规范规定:岩石 λ = 1.0。

考虑到本次试验为验证性试验,荷载箱应设置在平衡点处,由于嵌岩桩主要是桩端发挥承载力,平衡点应该位于下段桩,因此荷载箱选择尽量靠近桩端,当荷载箱以下的桩侧阻力与桩端阻力之和达到极限值时,荷载箱以上的桩侧阻力同时达到极限值。并考虑方便施工,综合确定荷载箱的埋设标高,试桩基本参数见表 5。

表 5 试桩基本参数

桩号	SZ1	SZ2	SZ3
有效桩长/m	24	24	24
桩径/mm	1000	1000	1000
桩顶标高/m	456.20 (-31.20)	456.20 (-31.20)	456.20 (-31.20)
参考地勘钻孔	钻孔 TL10	钻孔 TL20	钻孔 TL36
荷载箱位置	桩底以上 5.0 m	桩底以上 5.0 m	桩底以上 5.0 m

(3)等效转换。按照上、下段桩位移大小相等时荷载相加的原则进行等效转换,结合式(1)和式(2)可得到等效桩顶荷载-沉降曲线。

$$\begin{cases} \Delta s = \frac{\left[\frac{(Q_{uu} - w)}{\gamma_1} + 2Q_{ud} \right] L_u}{2E_p A_p} \\ s = s_d + \Delta s \end{cases} \tag{5}$$

式中: s_d 为荷载箱向下位移,mm; Δs 为桩身压缩量,mm; L_u 为上段桩长,m; A_p 为桩身截面积,m²; E_p 为

桩身弹性模量,MPa。

(4) 承载力计算。实测得到荷载箱上段桩的极限承载力 Q_{uu} 和荷载箱下段桩的极限承载力 Q_{ud} , 根据建筑基桩自平衡静载试验技术规程可知^[16], 试桩的极限承载力可按下式计算:

$$Q_u = \frac{Q_{uu} - w}{\gamma_1} + Q_{ud} \tag{6}$$

式中: Q_u 为单桩竖向承载力极限值; Q_{uu} 为上段桩的极限加载值; Q_{ud} 为下段桩的极限加载值; w 为荷载箱上段桩的自重与附加重量之和; γ_1 为受检桩的抗压摩阻力转换系数,可根据地区经验确定,通常取 0.8 ~ 1.0 之间,长桩及黏性土取大值,短桩或砂土取小值,本项目岩层为中风化泥岩且为长桩,故 γ_1 取 1.0。

3 结果分析

3.1 桩身完整性分析

中海成都超塔项目的 3 根试混凝土等级均为 C50,桩径为 1.0 m,桩长 24 m,布置三根声测管,呈三角形布置。浇筑 14 d 后采用武汉岩海 RS-ST06D (T) 对试桩 3 个剖面同时进行水平测量,测试结果如图 5—图 7 所示。

运用 PSD-V-A 法对 3 根试桩实测曲线进行判断,由 PSD 曲线可知:在距离桩底 5.0 m 左右位置处曲线存在明显的突变,这正是埋设荷载箱的位置,与实际情况较为相符;图中各个侧面声速均大于临界值,只有 SZ1 在桩底附件位置处出现了声幅较小于临界值,但偏差不大。一般而言,桩底位置处的粗骨料较多而细骨料相对较少,从而会增加声学反射界面,反射界面的增加会导致声波的反射及散射加剧,波的衰减程度加剧,从而导致波的声能降低,造成较大波幅下降。而其他两个剖面未出现类似情况,根据工程经验可知当个别测点出现波幅略小于临界值但波速正常时,可视为非缺陷点。结合实测影像图可知,影像图均匀完整,从桩底部到桩顶逐点未出现声学参数异常现象,各波形正常。结合表 3 可以判定 3 根试桩质量等级为 I 类桩。

3.2 桩的承载力测试

根据地勘报告可知,桩周均为中风化岩层,成桩后承载力很高,试验时荷载箱向上、向下位移量都非常小。3 根试桩于 2021 年 12 月 08 日开始试验,当加载至试验要求的最大荷载时,持荷 2 h 达到稳定标准,满足加载终止条件,之后分 5 级卸载。3 根试桩的位移情况如表 6—表 8 所示。

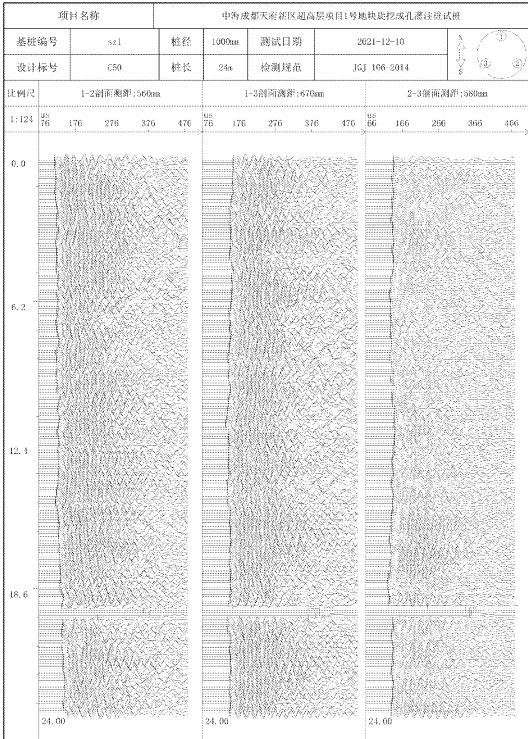
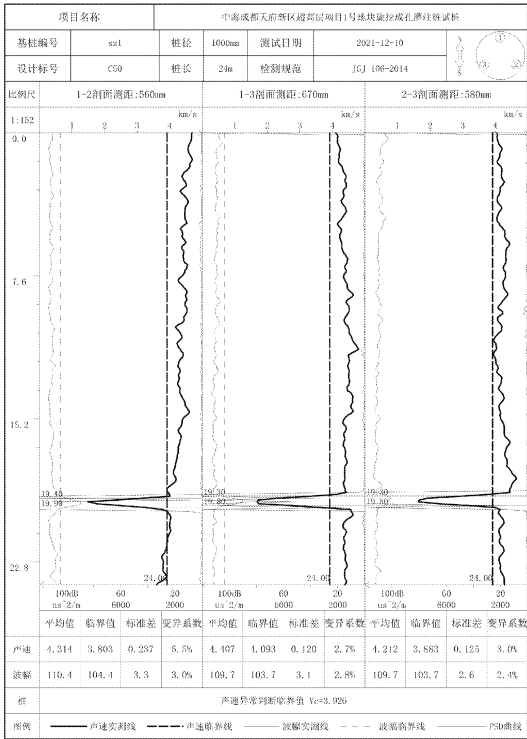
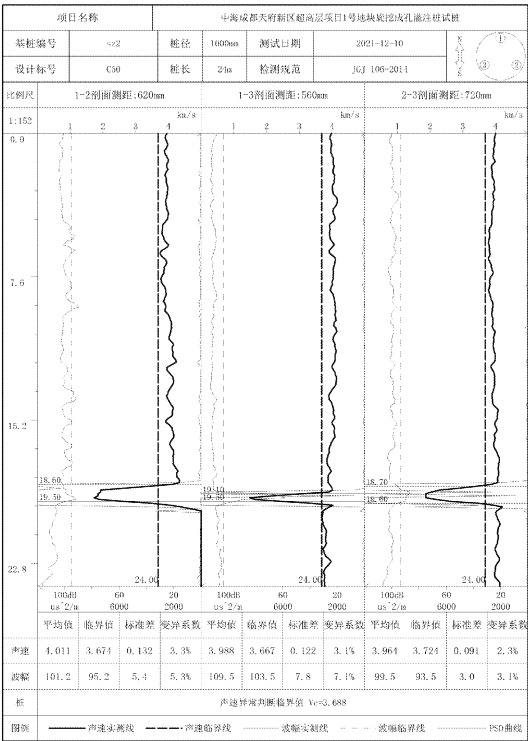
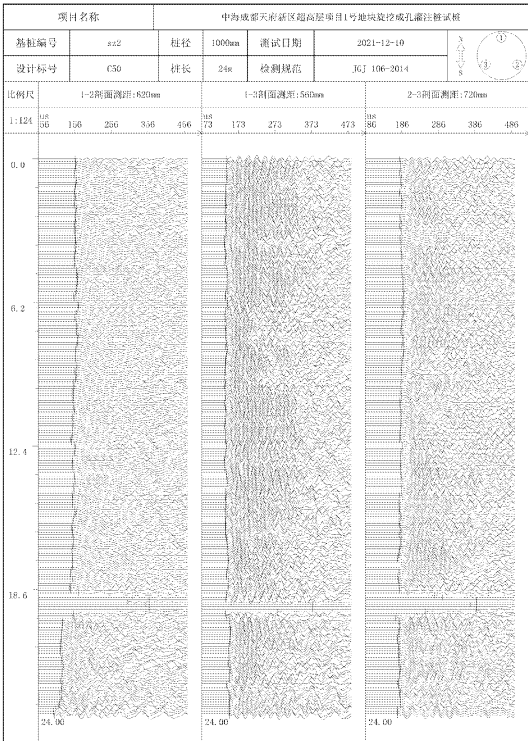


图 5 SZ1 桩声波检测结果

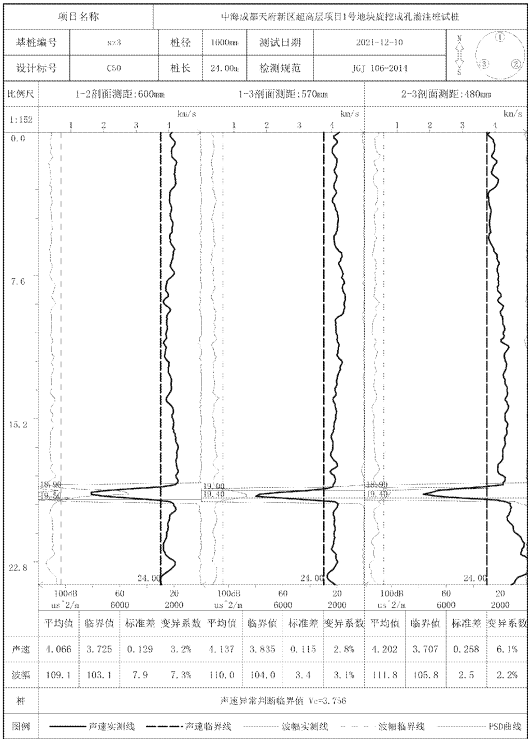


(a) 声速、波幅、PSD曲线图

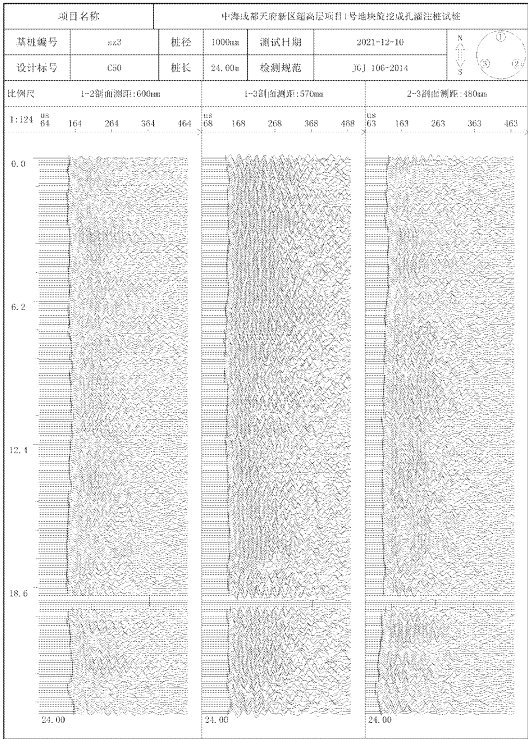


(b) 实测波形曲线

图 6 SZ2 桩声波检测结果



(a) 声速、波幅、PSD曲线图



(b) 实测波形曲线

图 7 SZ3 桩声波检测结果

由表6—表8可知;SZ1 向下最大位移量为3.88 mm,下桩最大回弹量 1.55 mm,回弹率为 39.98% ;

向上最大位移量为 3.77 mm,上桩最大回弹量 1.11 mm,回弹率为 29.44% ;SZ2 向下最大位移量为

4.12 mm,下桩最大回弹量 1.59 mm,回弹率为 38.59%;向上最大位移量为 4.47 mm,上桩最大回弹量 1.24 mm,回弹率为 27.74%;SZ3 向下最大位移量为 4.58 mm,下桩最大回弹量为 1.99 mm,回弹率为 43.45%;向上最大位移量为 4.63 mm,上桩最大回弹量 1.06 mm,回弹率为 22.8%。

现场实测的荷载-位移曲线($Q-S$ 曲线)见图 8。

表 6 SZ1 号桩试验荷载分级及相应位移

分级	荷 载 /kN	下桩沉降/mm		上桩上拔/mm	
		本级	累计	本级	累计
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2800	0.02	0.02	0.03	0.03
2	4200	0.03	0.05	0.02	0.05
3	5600	0.05	0.09	0.05	0.10
4	7000	0.20	0.29	0.22	0.32
5	8400	0.45	0.74	0.87	1.18
6	9800	0.96	1.70	0.68	1.86
7	11200	0.66	2.36	0.61	2.47
8	12600	0.45	2.81	0.50	2.97
9	14000	0.66	3.46	0.46	3.43
10	15000	0.42	3.88	0.35	3.77
11	11200	-0.11	3.76	-0.10	3.68
12	8400	-0.16	3.61	-0.13	3.54
13	5600	-0.25	3.36	-0.27	3.27
14	2800	-0.42	2.94	-0.27	3.00
15	0	-0.61	2.32	-0.34	2.66

表 7 SZ2 号桩试验荷载分级及相应位移

分级	荷 载 /kN	下桩沉降/mm		上桩上拔/mm	
		本级	累计	本级	累计
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2800	0.04	0.04	0.03	0.03
2	4200	0.06	0.10	0.06	0.09
3	5600	0.05	0.15	0.05	0.13
4	7000	0.11	0.26	0.20	0.33
5	8400	0.89	1.15	0.89	1.21
6	9800	0.60	1.75	0.62	1.83
7	11200	0.58	2.33	0.61	2.44
8	12600	0.52	2.85	0.56	3.00
9	14000	0.73	3.58	0.95	3.95
10	15000	0.55	4.12	0.53	4.47
11	11200	-0.13	4.00	-0.11	4.36
12	8400	-0.15	3.84	-0.16	4.21
13	5600	-0.30	3.55	-0.23	3.98
14	2800	-0.47	3.08	-0.34	3.64
15	0	-0.55	2.53	-0.41	3.24

表 8 SZ3 号桩试验荷载分级及相应位移

分级	荷 载 /kN	下桩沉降/mm		上桩上拔/mm	
		本级	累计	本级	累计
0	0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	2800	0.01	0.01	0.01	0.01
2	4200	0.03	0.04	0.04	0.05
3	5600	0.06	0.10	0.04	0.08
4	7000	0.14	0.24	0.20	0.28
5	8400	0.90	1.13	0.82	1.10
6	9800	0.72	1.85	0.72	1.81
7	11200	0.50	2.35	0.65	2.46
8	12600	0.45	2.79	0.58	3.03
9	14000	0.77	3.56	0.80	3.83
10	15000	1.02	4.58	0.80	4.63
11	11200	-0.13	4.44	-0.07	4.57
12	8400	-0.26	4.18	-0.09	4.48
13	5600	-0.31	3.87	-0.18	4.30
14	2800	-0.57	3.30	-0.31	3.99
15	0	-0.72	2.58	-0.42	3.57

由图 8 可知:位移曲线呈双曲线变化,加载过程中变化规律基本一致,3 根试桩在初级加载过程中上下位移均较小,且随着加载等级的增大位移逐渐增大。3 根试桩的上下位移都小于 5 mm,说明桩侧或桩端阻力得到较为充分的发挥。从回弹率来看,3 根试桩的回弹率平均值为 33.67%,说明 3 根试桩的加载强度已接近其极限加载强度,接近破坏,故回弹率较小。

根据简化等效转换原则:SZ1 号、SZ2 号、SZ3 号桩等效转换数据见表 9。

由表 9 可知:SZ1、SZ2、SZ3 桩转换后的试桩桩顶荷载均为 29 776 kN 且试桩均未达到破坏状态,大于单桩竖向承载力标准值(28 000 kN)。

依据公式法确定试桩极限承载力,上下段桩的加载极限为 15 000 kN,荷载箱以上桩段自重约为 606 kN, γ_1 取 1.0,根据计算式(6)可知: $Q_u=29\,394$ kN。

综上所述:故 3 根试桩的极限承载力试验推荐值均不小于 29 394 kN,而桩设计竖向承载力标准值为 28 000 kN,满足设计要求。

4 结 论

(1) 试验过程利用声波透射法进行桩身完整性检测,结果显示试桩的桩身混凝土材质分布较为均匀,桩身较为完整,3 根试桩均可判为 I 类桩。

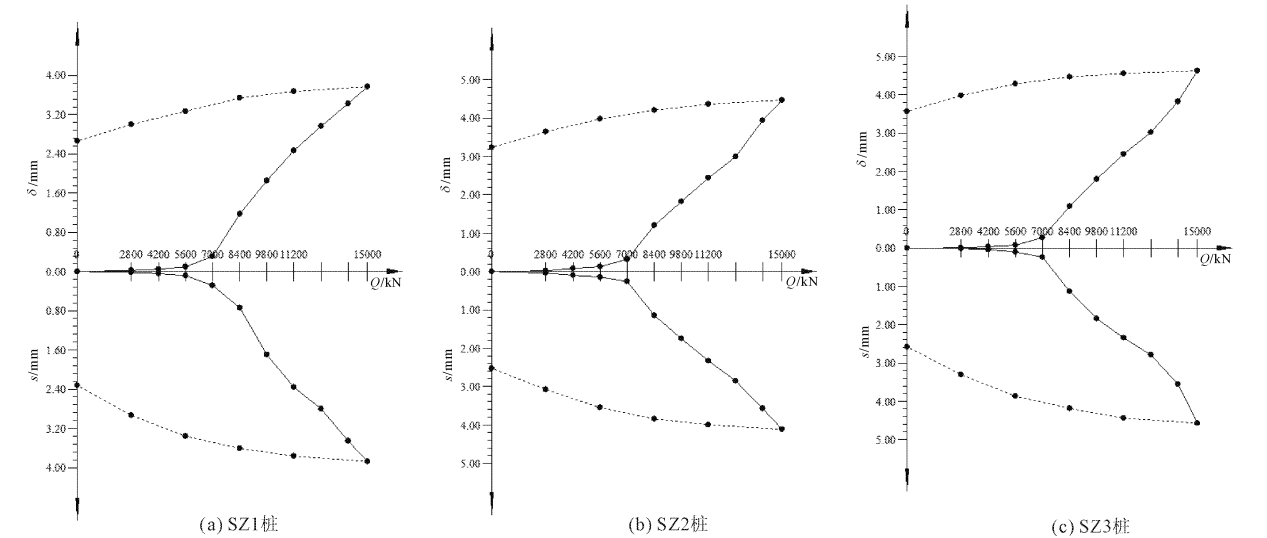


图 8 实测的荷载-位移曲线图

表 9 等效转换数据

分级	桩顶等效荷载/kN			桩顶等效位移/mm		
	SZ1 桩	SZ2 桩	SZ3 桩	SZ1 桩	SZ2 桩	SZ3 桩
0	0	0	0	0.00	0.00	0.00
1	5376	5376	5376	2.89	2.91	2.88
2	8176	8176	8176	4.38	4.44	4.38
3	10976	10976	10976	5.90	5.96	5.91
4	13776	13776	13776	7.57	7.54	7.52
5	16576	16576	16576	9.50	9.91	9.89
6	19376	19376	19376	11.93	11.98	12.07
7	22176	22176	22176	14.06	14.03	14.05
8	24976	24976	24976	15.98	16.02	15.96
9	27776	27776	27776	18.11	18.22	18.20
10	29776	29776	29776	19.57	19.82	20.27

(2) 自平衡试桩试验过程正常,未出现异常突变数据。由于桩周土均为中风化岩且成桩质量较好,荷载箱向上、向下位移量都较小,SZ1 试桩测试荷载箱向上位移仅 3.77 mm,向下最大位移量为 3.88 mm;SZ2 向下最大位移量为 4.12 mm,向上最大位移量为 4.47 mm;SZ3 向下最大位移量为 4.58 mm,向上最大位移量为 4.63 mm。3 根试桩的上段桩与下段位移的位移较为接近,说明荷载箱的位置选择是比较合理的,将荷载箱设置于平衡点附近是可行的。

(3) 依据试验加载数据分析,分别用公式法和简化转换法得到了试桩的承载力试验实测值。得到桩顶荷载承载力均为 29 776 kN,SZ1 的桩顶位移为 19.57 mm;SZ2 桩顶位移为 19.82 mm;SZ3 的桩顶位移为 20.27 mm。

(4) 通过试验分析可知:3 根试桩的极限承载力试验推荐值均不小于 29 394 kN,而桩设计竖向承载力标准值为 28 000 kN,满足设计要求,且自平衡所测结果是偏于保守的。

(5) 自平衡加载过程均为全自动加载,排除了人为主管因素的影响,而从项目工期、成本、现场试验条件来看,自平衡法试验时间较短,成本相对较少,经估算,自平衡检测费用可节省 30%~60%,具体比例视桩吨位与地质条件而定,尤其是能克服因场地条件而无法堆载的难题。

参考文献:

[1] 滕延京,宫剑飞,李建民.基础工程技术发展综述[J]. 土木工程学报,2012,45(5):126-140,161.

[2] 史佩栋.我国深基础工程技术发展现状与展望:21 世纪头 10 a 情况综述[J]. 岩土工程学报,2011,33(S2): 1-14.

[3] 王之洋,陈朝蒲,白文磊,等.高铁列车通过高架桥桩基础激发地震波响应分析[J]. 地球物理学报,2022, 65(7):2622-2635.

[4] 桑松魁,白晓宇,孔 亮,等.层状黏性土中静压桩沉贯特性现场试验[J]. 岩石力学与工程学报,2022,41 (10):2135-2148.

[5] 周亚龙,王 旭,张延杰,等.灌注桩基础桩底复合式后注浆及承载特性研究[J]. 岩土工程学报,2022,44 (10):1864-1872.

[6] 谭 鑫,冯龙健,胡政博,等.竖向荷载下软土中碎石单桩破坏模式及承载力计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(9):10-19.

[7] 纠永志,祝彦知.开挖条件下非均质地基中单桩竖向承载特性非线性分析[J]. 岩土力学,2017,38(6):

- 1666-1674.
- [8] 何奔,王欢,洪义,等. 竖向荷载对黏土地基中单桩水平受荷性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(7):1221-1229.
- [9] 欧孝夺,白露,吕政凡,等. 黏土地基中自平衡试桩 $Q-s$ 曲线解析转换方法及模型试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(2):631-642.
- [10] Li Jianhang, Li Xiaojuan, Gao Luchao, et al. Conversion factor analysis of self-balanced loading test of cast-in-situ piles based on analogue test method[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2019, 35(2):185-190.
- [11] 张广彬,姬同庚,李志斌. 超大吨位自平衡法与静压法荷载试验结果比对研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S2):471-474.
- [12] 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.
- [13] 鲍育明,刘亚文,李志成,等. 自平衡法在桩基承载力检测中的应用[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2003(3):49-52.
- [14] 张广彬,姬同庚,李志斌. 超大吨位自平衡法与静压法荷载试验结果比对研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S2):471-474.
- [15] 张帆,龚维明,戴国亮. 大直径超长灌注桩荷载传递机理的自平衡试验研究[J]. 岩土工程学报,2006(4):464-469.
- [16] 欧孝夺,白露,江杰,等. 膨胀土地区自平衡试桩转换系数影响因素分析[J]. 人民长江,2022,53(5):189-196,212.
- [17] 朱超,贾学斌,杨宇. 大吨位嵌岩桩承载力现场足尺试验研究[J]. 建筑结构,2021,51(S2):1608-1612.
- [18] 李家龙,罗顺江,胡俊,等. 虎跳峡金沙江大桥桩自平衡试验分析[J]. 公路,2020,65(5):144-148.
- [19] 鲍树峰,刘永锋. 科威特 Boubyan 岛海港工程公路桥预备桩试桩分析[J]. 施工技术,2012,41(1):36-41.
- [20] 戴国亮,龚维明,王磊,等. 自平衡试桩法在港口码头钢管复合桩中的应用[J]. 中国港湾建设,2017,37(10):37-41.
- [21] 戴国亮,龚维明,程晔,等. 自平衡测试技术及桩端后压浆工艺在大直径超长桩的应用[J]. 岩土工程学报,2005(6):690-694.
- [22] 中国建筑西南勘察设计院有限公司. 中海成都天府新区超高层项目1号地块岩土工程勘察报告[R]. 成都:中国建筑西南勘察设计院有限公司,2020.
- [23] 建筑基桩检测技术规范:JGJ 106—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [24] 建筑基桩自平衡静载试验技术规程:JGJ/T 403—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [25] 刘仰玉,鲁守尊,李奎杰,等. 声波透射法在南水北调调压井桩基完整性检测中的应用[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2019,50(4):661-665.
- [26] 龚维明,戴国亮,蒋永生,等. 桩承载力自平衡测试理论与实践[J]. 建筑结构学报,2002(1):82-88.
- [27] 龚维明,戴国亮. 桩承载力自平衡法的几个关键问题讨论[J]. 公路,2005(8):24-27.

(上接第191页)

- [3] 唐玉恩. 城市发展中的历史街区、历史建筑保护利用[J]. 建筑实践,2022,43(6):10-21.
- [4] 杨敏,马俊杰,张俊. 三维激光扫描技术在复杂曲面中的应用[J]. 测绘科学技术,2021,9(3):82-89.
- [5] 陆道渊,黄良,唐波,等. 三维激光扫描技术在世茂深坑酒店基础设计中的应用[J]. 结构工程师,2016,32(2):159-164.
- [6] 李密. 上海某名人旧居危险性鉴定与修缮应用[J]. 住宅科技,2016,36(8):46-50.
- [7] 杨敏. 上海里弄建筑甄别中的三维测绘技术应用[J]. 住宅科技,2022,42(12):61-64.
- [8] 李东琴,金煜业. 浅谈墙体的设计要求及加固措施[J]. 科技风,2010(13):183-185.
- [9] 杨敏,方林,张俊. 三维激光扫描在既有建筑检测中的应用[J]. 城市建筑空间,2022,29(11):247-248,251.
- [10] 张诗墨. 建筑装饰工程中的工艺美术应用分析[J]. 新型建筑材料,2020,47(2):150.
- [11] 曹炳政,陈海斌. 上海华侨大楼改造抗震性能鉴定[J]. 建筑技术,2015,46(S2):386-388.
- [12] 陈小杰. 无人机摄影三维建模在历史建筑中的应用[J]. 住宅科技,2022,42(7):54-57.
- [13] 顾玄龙,刘成龙,郭伟. 现代智能型全站仪不整平不对中测量的可行性分析[J]. 测绘通报,2018(10):79-89,92.
- [14] 李伟,宋晓岩,薛启超. 木屋盖结构加固改造后的有限元分析[J]. 木材工业,2017,31(5):27-31.
- [15] 许志洋,丁丹,赵美云. 基于逆向工程技术三维实体建模与加工的研究[J]. 齐齐哈尔大学学报,2021,37(1):6-10.