

文章编号: 1674—8247(2023)06—0013—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.06.003

基桩竖向加载极限承载力现场试验研究

邓宏科¹ 史永跃²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 中铁西南科学研究院有限公司, 成都 611731)

摘 要:基桩极限承载力判定是工程界研究的热点和难点。为掌握加载过程中桩侧及桩端阻力的分布和位移变化规律,在同一试桩进行了两次现场原型桩静力试桩试验,研究了静载试验的 $Q-s$ 曲线、轴力及端阻的承载机理、变形及破坏特征,结果表明:(1)加载方法、试验先后顺序及加载量级对基桩的承载特性和变形具有明显的影响;(2)在极限承载力附近减小每级加载量,缓变形 $Q-s$ 曲线的基桩在首次破坏时,桩端会发生一个突然向下的脉冲式反弹,呈倒“V”字型,其尖点的前一级荷载可以作为该桩的极限承载力。研究成果对工程桩的设计和检测具有重要指导意义。

关键词:静力试桩;极限承载力;“V”型法则; $Q-s$ 曲线;桩端位移

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

Field Test of Ultimate Bearing Capacity of Foundation Pile under Vertical Loading

DENG Hongke¹ SHI Yongyue²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: Determining the ultimate bearing capacity of foundation piles is a hot topic and a challenge in the engineering field. In order to understand the distribution and displacement changes of pile side resistance and pile tip resistance during the loading process, two onsite prototype pile static loading tests were conducted on the same test pile. The study explored the $Q-s$ curve of static load tests, the bearing mechanism of axial force and end resistance, deformation, and failure characteristics. The results show: (1) The loading method, sequence of tests, and scale of loading will significantly affect the bearing characteristics and deformation of the foundation pile. (2) When the load is reduced at each stage near the ultimate bearing capacity, the foundation pile with the slow deformation $Q-s$ curve will experience a sudden pulse rebound downwards at the pile tip during the first failure, forming an inverted “V” shape. The load at the point preceding the tip of the “V” can be taken as the ultimate bearing capacity of that pile. The results of this study have important guiding significance for the design and testing of engineering piles.

Key words: static test pile; ultimate bearing capacity; “V” rule; $Q-s$ curve; pile tip displacement

随着我国基础设施规模及投资的不断加大,桩基础被广泛应用于房屋建筑、水利水电、交通、港口码头

等领域。因桩基承载力不足发生工程安全、影响结构正常使用事故时有发生。基桩施工属于隐蔽工程,

收稿日期:2023-01-16

作者简介:邓宏科(1977-),男,高级工程师。

引文格式:邓宏科,史永跃.基桩竖向加载极限承载力现场试验研究[J].高速铁路技术,2023,14(6):13-18.

DENG Hongke, SHI Yongyue. Field Test of Ultimate Bearing Capacity of Foundation Pile under Vertical Loading [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(6):13-18.

且影响基桩质量和承载力的因素繁多,基桩的施工质量和变形破坏特征很难掌控。吕福庆^[1]认为桩的竖向静载试验极限承载力的确定是试验数据处理的关键,介绍了4种类型、13种判定基桩极限承载力的方法,认为可同时采用 P - s 曲线法、 s - lgt 法及 lgP - lgs 法综合评价试桩的极限承载力,以提高评价结果的准确性;郑颖人^[2-5]等通过理论分析、数值计算、室内模拟试验对桩顶荷载、位移、桩侧摩阻力与桩底反力进行了全方位测试,对比了静载荷试验、强度折减法(双折减系数、单折减系数)、荷载增量法的试验及计算结果,建议以基桩静载试验的位移曲线或阻力曲线“V”型尖点的前一荷载折减系数为该桩顶荷载条件下基础的安全储备系数。现行规范主要以试桩 Q - s 曲线变化特征为依据^[6],按照有无明显拐点提出极限承载力的判定标准,陡降型 Q - s 曲线较易确定基桩极限承载力。然而,现场大部分试桩为工程桩以缓变型 Q - s 曲线为主,很难提供真实的极限承载力和判断基桩是否破坏。此外,由于现场试验条件、费用和加载时间的限制,原型桩多次加载静力试桩试验较少,可供分析

的数据也较少。

鉴于此,本文在同一根试桩先后进行了两次现场原型桩竖向堆载试验,研究原型基桩的破坏机理和承载能力,提出桩基的破坏及承载机理和判定极限荷载的合理方法,以满足工程设计和检测的需要。

1 试桩场地地层岩性

- 试验场地地层从上到下分别为:
- ①杂填土,厚度1.0 m,杂色,松散,由碎石、角砾、砾砂及黏性土组成。
 - ②淤泥质粉质黏土,厚度1.5 m,灰色,流塑,饱和,含少量粉土、粉细砂及云母贝壳碎片,干强度、韧性中等。
 - ⑤粉质黏土,厚度0.7 m,黄褐色,可塑,切面稍光滑,干强度、韧性中等。
 - ⑦含角砾粉质黏土,未揭穿,褐黄色,硬可塑,角砾含量20%左右,切面粗糙,干强度、韧性中等,其中12.0~15.0 m之间碎石含量较多。
- 主要岩土物理力学参数如表1所示。

表1 场地岩土物理力学参数表

岩土名称	天然含水量 $w/\%$	天然孔隙比 e	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	塑性指数 I_P	液性指数 I_L	直剪		压缩模量 E_{s1-2}/MPa
								黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	
淤泥质粉质黏土	38.3	1.212	18.8	37.9	21.7	16.6	1.12	11.9	10.5	3.16
含角砾粉质黏土	22.9	0.677	21.3	30.4	18.5	12.3	0.43	16.7	18.6	5.58

2 试验桩设计与成桩

2.1 试桩基本参数

试桩长8.5 m,桩径650 mm,主筋8根 $\phi 18$,螺旋箍筋 $\phi 6$,在桩顶、桩端1 m范围加密,每2 m加设1个 $\phi 12$ 环形箍,桩端进入含角砾粉质黏土5 m左右,用C30混凝土灌注成桩,如图1所示。

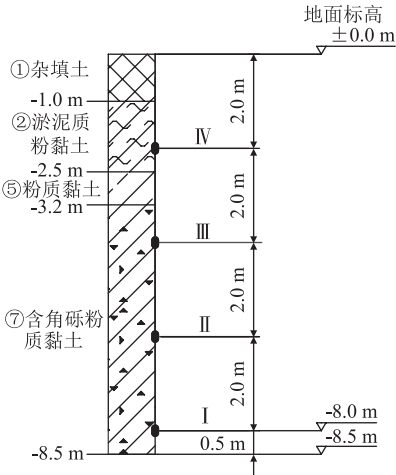


图1 桩身应力计布置图

2.2 桩底位移测杆

在试桩呈120°的主筋上固定三根通长的钢套管,外管内径 $\phi 38$,以外径 $\phi 22$ 的内管作为位移杆量测桩端位移,内、外钢管固定在桩底钢板上,确保与桩底同步变形,内管高出外管约20 cm,如图2所示。

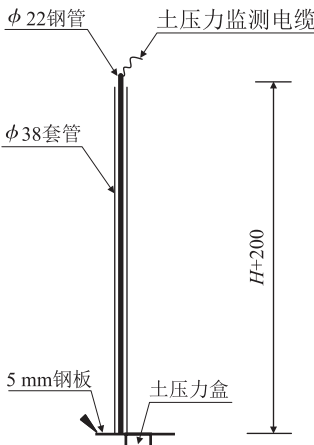


图2 桩底位移量测管图

2.3 钢筋应力计

从试桩顶端向下每间隔2 m布设3个钢筋应力计,

共布设 12 个,最下端的钢筋计布设于桩端以上 0.5 m 处。钢筋计绑焊连接在 $\phi 18$ 的主筋上,间隔 1~2 根主筋布设 1 个钢筋计,在出线部位用硅胶做防水处理。先用细塑料管将传感器出线端保护 1 m 左右,每层 3 根钢筋计的数据线汇集到一起穿过软管沿主筋敷设至桩顶以上。

2.4 振弦式土压力盒安装

土压力盒按 120° 角度安设于桩底的钢板下方,采用限位装置将土压力盒固定于桩端土层中,数据线从桩端位移监测内管引出,用橡胶塞在桩顶加以保护。桩端土压力盒布置如图 3 所示。

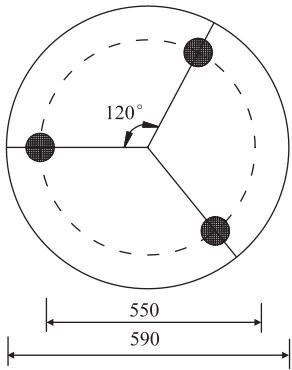


图 3 桩端土压力盒平面布置以及孔口限位装置平面图(mm)

3 基桩现场静载试验

采用慢速维持荷载法进行试桩的静力加载试验,为了能快速测读传感器的频率,将钢筋计和土压力盒的数据线连接到接线柱上;采用精度为 0.01 mm 的电感位移传感器量测桩底和桩顶位移,在桩顶对称安设 4 个量测桩顶位移的传感器,每根内测杆侧壁焊接 1 个钢片,用来安设位移传感器,在静力试桩过程中量测桩端位移变化。

两次加载试验前都测读了钢筋应力计和土压力盒的初始值,以保证所有传感器处于正常状态。采用油压千斤顶自动加压,每级荷载施加后测读桩顶、桩端位移、钢筋计、土压力盒的位移及频率;前 3 次在第 5 min、10 min、15 min 测读,在 15 min 之后,每隔 15 min 测读 1 次,每小时内桩顶位移差小于 0.1 mm 时判定为稳定,并施加下一级荷载。现场试验主要判定缓变型 $Q-s$ 曲线的极限承载力,在预计达到极限承载力附近时减少单级加载量,试验中将单级加载量控制在 50 kN 左右。

完成试验桩灌注的 28 d 后,采用堆载平台法对试验桩进行慢速维持荷载法静载试验,反力装置由配重钢筋混凝土块、千斤顶、主次梁、支墩等构成。

根据规范,压重不应少于最大试验荷载的 1.2 倍,在试验开始之前 1 次性将压重加在平台上,并确保重物堆放均匀稳固。在第 1 次静载试验 7 d 后,再次采用堆载慢速维持荷载法对该桩进行承载力试验。静压反力设备采用圆形伞形架堆载平台,采用伞形架、砂包堆载反力系统,反力系统一次加足 4 000 kN 配重,各级荷载试验桩端阻力及位移如表 2、表 3 所示。

表 2 第 1 次堆载试验加载及桩顶与桩端位移表

序号	第 1 次堆载				
	试验荷载 /kN	单级加载量/kN	桩顶位移 /mm	桩端压力 /kN	桩端位移 /mm
1	250	250	0.24	5.85	0.13
2	500	250	0.45	31.44	0.32
3	750	250	0.95	29.46	0.59
4	1 000	250	1.48	39.92	1.08
5	1 250	250	2.04	46.43	1.56
6	1 500	250	2.60	51.78	2.10
7	1 750	250	3.68	62.97	3.08
8	2 000	250	4.94	78.71	4.27
9	2 150	150	5.66	92.47	4.90
10	2 200	50	6.11	97.85	5.34
11	2 250	50	6.42	105.91	5.66
12	2 300	50	6.58	104.47	5.83
13	2 350	50	7.11	112.63	6.29
14	2 410	60	7.85	117.66	7.02
15	2 450	40	8.38	123.92	7.69
16	2 510	60	8.67	133.94	8.27
17	2 660	150	9.69	140.67	8.92
18	2 700	40	10.31	152.44	9.44

4 竖向静载试桩结果分析

4.1 各级荷载桩身轴力

假定桩身各截面的应力相等且分布均匀,桩身应力沿桩长线性分布,利用材料力学力的平衡和变形协调原理,将钢筋计各段应力和变形由桩顶到桩底累加,便可得到桩身的轴力、侧阻、端阻等有关参数。在基桩竖向主筋安设钢筋应力计的前提条件是基桩、主筋的变形量与钢筋应力计的竖向变形量一致,这样就可以通过钢筋计频率变化换算出主筋及基桩混凝土的应变,进而换算出桩轴力及桩侧摩阻力^[7-9]。

钢筋混凝土和素混凝土在结构中的弹性模量差别很小,主要与基桩的配筋率有关。假定钢筋和混凝土浇注在一起的变形一致,即任一断面钢筋和混凝土具有相同的应变值,这样就可以通过钢筋计的应力和应变计算出基桩各断面的轴力。在出料口取 C30 灌注商品混凝土 3 个试样,制成 150 mm × 150 mm × 150 mm 立方体试块,在标准养护条件下 28 d 的抗

表 3 第 2 次堆载试验加载及桩顶与桩端位移表					
序号	第 2 次堆载				
	试验荷载 /kN	单级加载量 /kN	桩顶位移 /mm	桩端压力 /kN	桩端位移 /mm
1	250	250	0.10	3.62	0.04
2	750	250	0.45	23.36	0.29
3	1 250	250	1.20	51.68	0.85
4	1 750	250	2.10	86.79	1.56
5	2 000	250	2.51	104.45	1.92
6	2 450	150	3.71	152.64	3.10
7	2 650	50	4.68	182.35	4.50
8	2 850	50	5.84	190.77	6.33
9	3 050	50	8.76	220.65	9.47
10	3 250	50	12.82	261.76	13.80
11	3 350	50	15.36	283.31	16.50
12	3 450	50	16.99	299.42	18.44
13	3 550	50	19.41	320.36	21.02
14	3 650	50	22.11	345.25	23.89
15	3 750	100	23.52	351.73	25.76
16	3 900	150	28.34	394.12	30.63

压强度平均值为 46.8 MPa,取混凝土弹性模量 $E_c=30\,000\text{ MPa}$,主筋的弹性模量 $E_g=200\,000\text{ MPa}$ 。测得各级荷载下钢筋计的钢弦振动频率,计算出相应横断面钢筋轴力和应变,从而计算得到各级荷载下的桩身轴力分布,如图 4、图 5 所示。

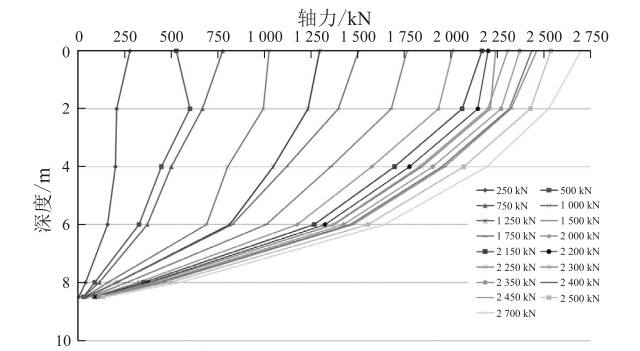


图 4 第 1 次静载试验桩身轴力分布曲线图

第 1 次试验加载了 18 级,预估极限承载力为 2 600 kN,在 2 000 kN 以后将单级加载量变为 50 kN,加载到 2 700 kN 仍未达到极限承载力,表明预估的承载力偏小;第 2 次试验加载了 37 级,从第 1 次试验的 2 500 kN 后按照每级 50 kN 加载,在 2 700 kN 和 3 450 kN 出现了陡变沉降。试验基桩的轴力向桩底逐渐减小,呈非线性分布,斜率的大小反映了侧摩阻力的大小及分布,即斜率越小,侧摩阻力越大。

从试验基桩轴力分布图可知,在各级试验荷载作用下,桩身轴力从桩顶向下逐渐减少,呈上陡下缓趋势,这与桩侧岩土的物理力学性质密切相关,桩侧岩

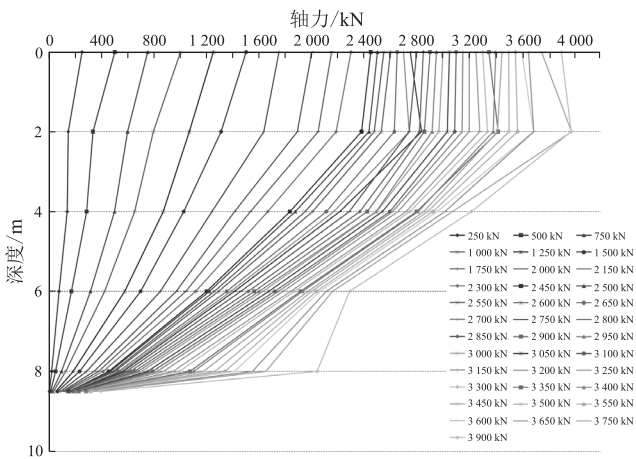


图 5 第 2 次静载试验桩身轴力分布曲线图

土强度越大,试桩轴力衰减越快,也即轴力分布线越缓;同时,试桩轴力的分布与试验荷载大小有关,试验加载越大,桩身轴力衰减越快,尤其在桩端范围内急剧降低;前几级荷载轴力分布曲线比较陡,表明桩侧摩阻力比较小,随着荷载的增加,轴力分布折线斜率变缓,表明侧摩阻力在桩土相对位移达到一定量值后才能得以发挥,桩端阻力若要得以充分发挥,桩顶位移量需要进一步增大。第 2 次试验加载到试桩的极限承载力时,试桩浅部轴力与桩顶荷载接近,表明浅部桩周土体进入了塑性阶段,提供的侧摩阻力有限,随着试验荷载的逐级增加,塑性区有向深部发展的趋势。

根据对现场试桩监测数据的综合分析,试桩侧阻力的发挥程度与桩土相对位移有关,即岩土层对基桩的侧阻随着试验加载而增加。由于受上覆地层的约束及压缩作用,在桩端上部一定范围内岩土侧阻力急剧增加,即摩阻力在桩端附近有一个显著突增的区段,且端阻对侧摩阻的强化效应在短桩中更为突出,其增加幅度与桩侧土层的性质、相对位移有关。因此,端承桩及摩擦端承桩要重视清孔质量,沉渣厚度要达到规范要求,避免发生承载力不足的质量问题。

4.2 基桩加载Q-s曲线

两次静载试桩在各级荷载下的桩顶及桩端沉降位移如图 6 所示。

从第 1 次静载试验结果可以看出,试验荷载最大值为 2 700 kN, Q-s 曲线呈缓变形,未出现陡降或沉降不收敛现象,试桩的承载力还未达到其极限值;最后一级荷载的桩顶沉降量为 10.31 mm,回弹为 2.26 mm,回弹率为 21.9%,桩端沉降量为 9.44 mm,回弹量为 1.02 mm,回弹率为 10.8%,卸载到 1 440 kN 时,桩端向下反弹了 0.33 mm 后又向上回弹;桩端最终卸载沉

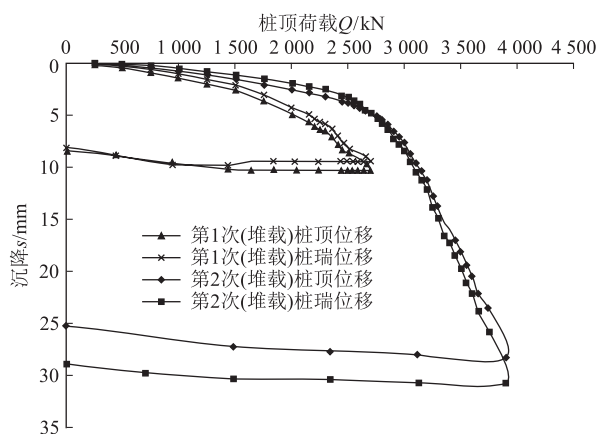
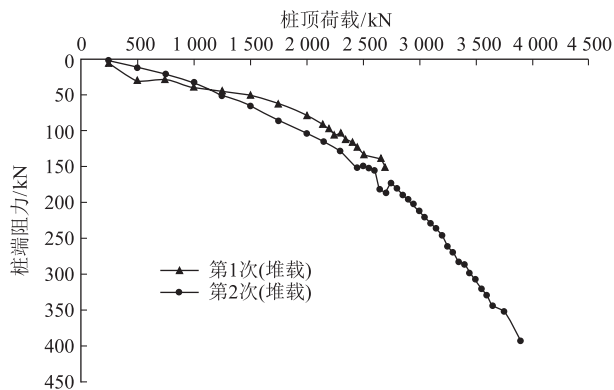
图6 竖向静载试验桩顶及桩端 $Q-s$ 曲线图

图7 试桩荷载-桩端阻力曲线图

降量比桩顶大了 0.37 mm,表明桩长略有伸长,但基本保持不变。

第1次试验加载过程对桩周及桩端土体具有压实挤密作用,致使第2次静载试验加载到 2 600 kN 之前的 $Q-s$ 曲线较第1次的更加平缓,且都是桩顶沉降大于桩端沉降;当加载到 2 650 kN 时,桩端出现1个向下突变的回弹变形;加载到 2 750 kN 时桩端沉降超过了桩顶沉降,且 $Q-s$ 曲线迅速变陡,桩顶与桩端的沉降差表现出随加载量的增加而增大的趋势;加载到最大试验荷载 3 900 kN 时,桩端沉降量达到 30.63 mm,桩顶沉降量为 28.34 mm,桩顶与桩端的沉降差达 2.29 mm。完全卸载后桩顶回弹量为 3.11 mm,回弹率 11.0%,桩端回弹量为 1.76 mm,回弹率 5.7%,桩端沉降量比桩顶沉降量大 3.64 mm,表明试桩在卸载后不同深度的回弹率不同,试桩总体有一定伸长。两次堆载回弹特点相似,桩顶最终回弹率约为桩端的 2 倍左右,且第2次试验桩顶及桩端卸载后的回弹率较第1次试验均降低了 1/2 左右。

4.3 桩端阻力及破坏特征

桩端阻力取 3 个土压力盒的平均值作为试桩的端阻力,当桩端 3 个土压力盒的极差超过其平均值的 30% 时,则剔除异常值,取剩余两个土压力盒的平均值作为试桩的端阻力。试桩在桩顶各级荷载作用下的桩端阻力如图 7 所示。

由图 7 可知:两次堆载试验在加载到 2 650 kN 之前的桩端阻力增加速率较为缓慢,且第2次加载试验在 1 250 kN 后的端阻力大于第1次试验的端阻力;第2次试验在荷载 2 450~2 600 kN 之间的桩端阻变化很小,出现一个微小波动的平台段,在接近第1次试验终止荷载时,即在 2 700~2 800 kN 段出现了端阻力突增后减小又增加段,呈倒“V”字型,表明桩端

土体出现了塑性变形,达到了试桩极限承载力;结合文献[2-5]的理论研究、数值分析及室内模型试验的研究成果,可将倒“V”型尖点荷载的前一级荷载 2 700 kN 作为该桩的极限承载力,远大于按照规范估算的单桩竖向极限承载力标准值 1 750 kN,且破坏时桩端阻力具有先减少后增大的规律。试桩继续加载到 3 650~3 750 kN 时又出现了一个微平台段,当加载到 3 900 kN 时再次出现了桩端阻力和沉降突然增加现象,桩端土体又一次进入了塑性变形阶段,表明桩基随着荷载的增加具有多次脉冲式弹塑性转化特点。由于桩端土体处于三维应力状态条件下,破坏和承载机理完全不同于浅基础,位移突变后桩底土体被压实,从而提高了桩底与桩侧土体的承载力,桩基破坏后承载力会随桩顶荷载增大而提高,承载力会很快恢复并进一步提高。

5 结论

(1) 基桩在极限荷载前卸载,回弹后基本能恢复到原桩长,当加载到极限承载力后到土体再次破坏,试桩产生了明显的伸长,桩顶及桩端的回弹率均为土体破坏前卸载的 1/2。

(2) 桩身轴力随着深度的增加而减少,呈上大下小的锥形分布,荷载越大,桩身轴力在桩底部附近衰减越显著;随着荷载的进一步增大,桩周土体的塑性区有向深部发展的趋势。

(3) 试桩在竖向静载试验过程中,桩顶荷载在 2 450~2 600 kN 时,桩端阻力出现一个微小波动的平台段,加载到 2 700 kN 时,桩端阻力突增后减小又增大,呈倒“V”字型,桩端位移也发生陡降,并大于桩顶位移,可将该倒“V”型的尖点前一级荷载 2 700 kN 作为该试桩首次破坏的极限承载力。

(4) 桩端土体处于三维应力状态, 桩基的破坏和承载机理不同于浅基础, 随着竖向荷载的不断增大, 桩端土体具有多次弹-塑性转化的特征, 承载力会很快恢复并进一步提高。

参考文献:

[1] 吕福庆, 吴文. 桩的垂直静载试验极限承载力判定方法综述[J]. 岩土力学, 1995, 16(4): 85-93.
LV Fuqing, WU Wen. A General Introduction on Determining the Limit Bearing Capacity in Static-load Experiment for Piles Depth of Pile-top Descent [J]. Rock and Soil Mechanics, 1995, 16(4): 85-93.

[2] 董天文, 郑颖人, 唐晓松. 强度折减法判定桩基础极限荷载的尖点突变条件[J]. 西南交通大学学报, 2014, 49(3): 373-378.
DONG Tianwen, ZHENG Yingren, TANG Xiaosong. Cusp Point Condition for Estimating Ultimate Load of Pile Foundation Based on Strength Reduction Method [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2014, 49(3): 373-378.

[3] 董天文, 郑颖人. 桩基础双折减系数有限元强度折减法极限分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3148-3154.
DONG Tianwen, ZHENG Yingren. Strength Reduction of Limit Analysis Finite Element Method for Pile Foundation by Two Reduction-factors [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3148-3154.

[4] 刘祥沛, 董天文, 郑颖人. 桩基础承载力室内试验与数值计算研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 719-728.
LIU Xiangpei, DONG Tianwen, ZHENG Yingren. Research on

the Failure Characteristics of Pile Foundation by the Laboratory Experiment and Numerical Calculation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 719-728.

[5] 刘祥沛, 董天文, 郑颖人. 有限元荷载增量法在判定桩基础极限荷载的应用[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(5): 144-148, 172.
LIU Xiangpei, DONG Tianwen, ZHENG Yingren. Application of Incremental Load Method of FEM in Determining the Ultimate Load of Pile Foundation [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016, 37(5): 144-148, 172.

[6] JGJ 106-2014 建筑基桩检测技术规范[S].
JGJ 106-2014 Technical Code for Testing of Building Foundation Piles[S].

[7] 史永跃, 王奎华, 董天文, 等. 真空负压静力试桩方法关键技术试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(5): 1699-1708.
SHI Yongyue, WANG Kuihua, DONG Tianwen, et al. Study of Key Technologies of Vacuum Negative-pressure Static Pile Load Test [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(5): 1699-1708.

[8] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代. 深厚软土非嵌岩超长桩受力性状试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 37(4): 64-69.
ZHANG Zhongmiao, XIN Gongfeng, XIA Tangdai. Test and Research on Unrock-socketed Super-long Pile in Deep Soft Soil [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(4): 64-69.

[9] 陈子文. 郑西客运专线桥梁桩基摩阻力试验研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(3): 42-48.
CHEN Ziwen. Experimental Study on Frictional Resistance of Bridge Pile Foundation of Zhengzhou-Xi'an Passenger Dedicated Line [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(3): 42-48.

(上接第12页)

Water-rich Karst Area [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 27-31.

[7] TB 10003-2016 铁路隧道设计规范[S].
TB 10003-2016 Code for Design of Railway Tunnels [S].

[8] 王文谦. 大跨度隧道围岩压力拱效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
WANG Wenqian. Study on Pressure Arch Effect of Surrounding Rock

of Long-span Tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[9] 于清浩, 郭庆昊, 王文谦, 等. 浅埋超大跨四线高铁隧道开挖力学特性研究[J]. 能源与环保, 2019, 41(7): 298-303.
YU Qinghao, GUO Qinghao, WANG Wenqian, et al. Study on Excavation Characteristic of Shallow-buried Super-span Four-line High-speed Railway Tunnel [J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(7): 298-303.