

文章编号: 1007-2993(2023)01-0083-06

# 钻孔扩底灌注桩承载性状分析

郑金伙

(福建省建筑设计研究院有限公司, 福建福州 350001)

**【摘要】** 为研究钻孔扩底灌注桩承载性状, 对 2 根不同扩大头形状的钻孔扩底灌注桩和 1 根等直径钻孔灌注桩进行单桩竖向抗压静载试验, 并对其中的扩底桩同步进行桩身应力测试。测试及数据分析结果表明: 沉渣及土层软化对扩底桩承载力影响较为敏感, 除了直接影响桩端阻力发挥外, 还会产生桩侧摩阻力弱化效应; 扩大头形状影响孔底清渣效果, 桩底高压注浆可消除或部分消除沉渣影响; 不同试验桩的同一土层桩侧摩阻力发挥值为非定值; 受扩底桩变径影响, 同一根试验桩的同一土层在变径处以上 3 m 范围内桩侧摩阻力较其 3 m 以上发挥值低 15%~40%。试验研究成果可为扩底桩设计与施工提供借鉴与参考。

**【关键词】** 扩底灌注桩; 桩底沉渣; 扩大头形状; 桩侧摩阻力; 弱化效应

**【中图分类号】** TU 473.1

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2023.01.015

## Analysis of Bearing Characteristic of Drilling Expanded Bottom Cast-in-situ Piles

Zheng Jinhua

(Fujian Provincial Institute Design and Research Co., Ltd., Fuzhou 350001, Fujian, China)

**【Abstract】** To study the bearing characteristic of drilling expanded bottom cast-in-situ pile, static load tests of two expanded bottom bored piles of different shape and one equal diameter pile were conducted, as well as pile stress tests of the expanded bottom bored piles. Test and data analysis results show that the influence of sediment and soil softening on the bearing capacity of expanded bottom pile is relatively sensitive. In addition to directly affecting the pile end resistance, it will also produce the weakening effect of pile side friction resistance. The shape of the enlarged head affects the slag removal effect at the bottom of the hole, and the high pressure grouting at the bottom of the pile can eliminate or partially eliminate the influence of the sediment. The development value of the pile side friction resistance of the same soil layer of different test piles is not fixed. Affected by the diameter change of the expanded bottom pile, the pile side friction resistance of the same soil layer of the same test pile within the range of 3 m above the diameter change is 15%~40%, lower than the value of the pile side friction within the range of 3 m above the diameter change. The test results can provide reference for the design and construction of expanded bottom piles.

**【Key words】** drilling expanded bottom cast-in-situ pile; pile bottom slime; enlarged head shape; pile side friction; weakening effect

### 0 引言

钻孔扩底灌注桩与同桩径、同桩长的直桩相比, 由于桩端面积增加, 其承载力可有效提高, 且经济效益显著<sup>[1-4]</sup>。为有效提高扩底桩单桩承载力, 桩端持力层多选取砂层、卵石层以及中等风化岩等岩土层<sup>[5-8]</sup>。文松霖<sup>[9]</sup>、王凤池等<sup>[10]</sup>、胡庆红等<sup>[11]</sup>进行了模型扩底桩以及原型扩底桩荷载传递机理研究, 并根据研究成果对扩底桩设计与施工进行完善和优化, 使得扩底桩的应用日趋成熟。

由于砂土状强风化岩作为灌注桩桩端持力层易

产生泡水软化、崩解特性<sup>[12-13]</sup>, 在桩端形成虚土, 极大地影响桩端持力层承载力正常发挥, 在直桩应用中常导致承载力无法达到设计要求。常规解决方法是通过桩底高压注浆, 解决了持力层泡水软化、崩解以及桩底沉渣问题, 有效加固了持力层, 提高桩端承载能力。但以砂土状强风化岩作为扩底桩桩端持力层, 若扩大头形状不合理会影响清渣效果, 同时与直桩相比, 扩大头部位更易于产生应力释放, 桩周、桩底土体向临空面变形更加明显, 更容易产生持力层泡水软化, 因此, 研究工作需要考虑影响因素更多, 说明了扩

底桩荷载传递影响因素的复杂性。

福州地区某工程基础桩以砂土状强风化岩作为桩端持力层,为研究钻孔扩底桩承载性状并优化设计,进行了试验桩测试。试验桩共计3根,其中2根为改进前后不同扩大头形状的钻孔扩底桩,另1根为等直径桩。测试项目为单桩竖向抗压静载试验和扩底桩桩身应力测试。扩大头形状改进前的扩底桩第一次静载荷试验承载力低,及时对该桩采取桩底高压注浆处理加固后,再次进行静载荷试验。从该扩底桩两次测试结果看,扩底桩承载力受沉渣和持力层软化影响较为敏感,不仅直接影响持力层正常发挥,而且还产生比直桩侧阻力弱化效应<sup>[14-16]</sup>更为严重的弱化作用,而通过扩底桩桩底高压注浆,持力层承载能力得到提高,桩侧阻力发挥值也得到提高,即发生桩侧阻力强化效应<sup>[17-18]</sup>,部分消除沉渣和持力层软化影响。本次测试分析了扩底桩承载力试验结果不理想的原因,提出了扩底桩的扩大头形状改进建议,得出以砂土状强风化岩作为持力层的扩底桩荷载传递性状研究成果,对类似地层扩底桩设计与施工提供一定参考和借鉴。

1 扩底桩试验概况

1.1 工程地质概况

试验场地岩土层自上而下分为:①杂填土,厚度

3.05~7.30 m;②淤泥,厚度3.29~6.38 m;③粉质黏土,厚度5.20~8.68 m;④淤泥质土,厚度3.50~12.23 m;⑤粉质黏土,厚度2.95~13.40 m;⑥砾砂,厚度0.60~3.00 m;⑦残积黏性土,厚度12.61~22.00 m;⑧砂土状强风化花岗岩,厚度6.60~17.15 m;⑨中等风化花岗岩。

各岩土层冲(钻)孔灌注桩设计力学指标见表1。为了正确评价试验结果,均在地质钻孔位置进行试桩,各桩周土层工程地质柱状图见图1。

表1 灌注桩设计力学指标

岩土层名称	极限侧阻力标准值 /kPa	极限端阻力标准值 /kPa
①杂填土	20	
②淤泥	12	
③粉质黏土	40	
④淤泥质土	18	
⑤粉质黏土	55	
⑥砾砂	70	
⑦残积黏性土	65	
⑧砂土状强风化花岗岩	85	2800
⑨中等风化花岗岩	280	13000

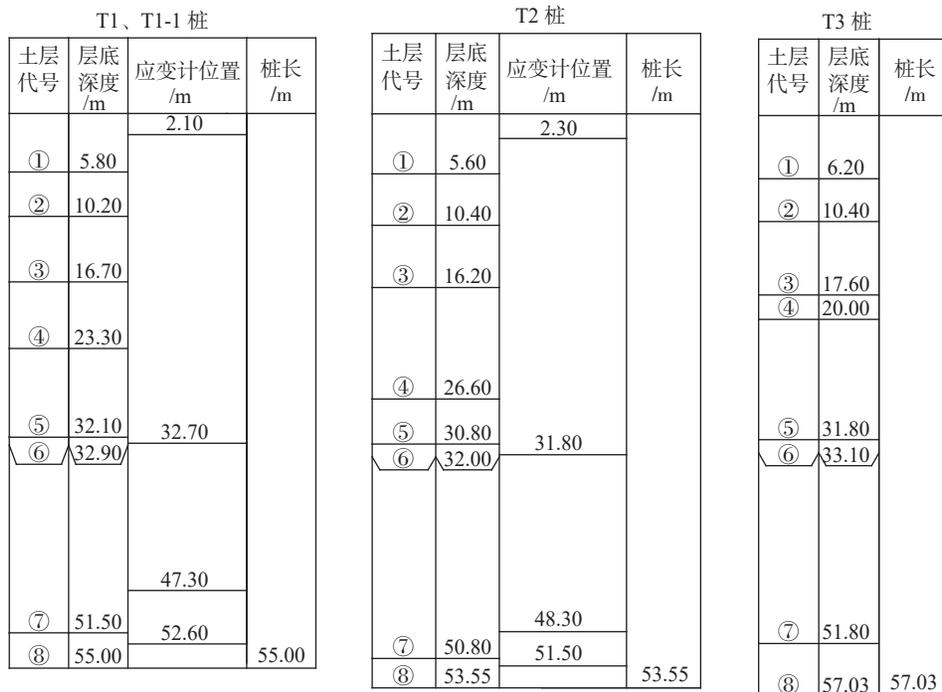


图1 各桩周土层工程地质柱状图

1.2 试验桩施工概况

试验桩共计3根(编号:T1—T3),桩径均为

850 mm,桩身混凝土设计强度为水下C40,桩端持力层选择砂土状强风化花岗岩。T1桩采用正循环清渣,

设计扩大头直径 1600 mm, 桩扩大头形状见图 2(a), 由于 T1 试验桩静载试验结果未能达到设计要求, 经分析可能是扩孔形状设计不当和孔底沉渣过厚引起, 因此进行 T2 桩施工, 采用泵吸反循环清渣, 为有效清除孔底沉渣, 首先要保证泥浆质量符合要求, 所以配置泥浆净化除砂器, 优化泥浆质量, 并在灌注混凝土之前泥浆比重控制在 1.12 ~ 1.15, 设计扩大头直径

1500 mm, 并改变桩端扩大头形状, 桩扩大头形状见图 2(b); 2 根扩头桩施工均采用水下机钻机扩方式, 即先采取机械钻进完成直孔施工至设计孔深, 之后提钻更换扩底钻头对桩端进行扩孔, 由于装有扩底直径到位标记, 保证扩底孔径和形状。由于 2 根扩底桩试验结果不理想, 为查明原因, 施工 T3 等直径直桩。试验桩主要施工参数见表 2。

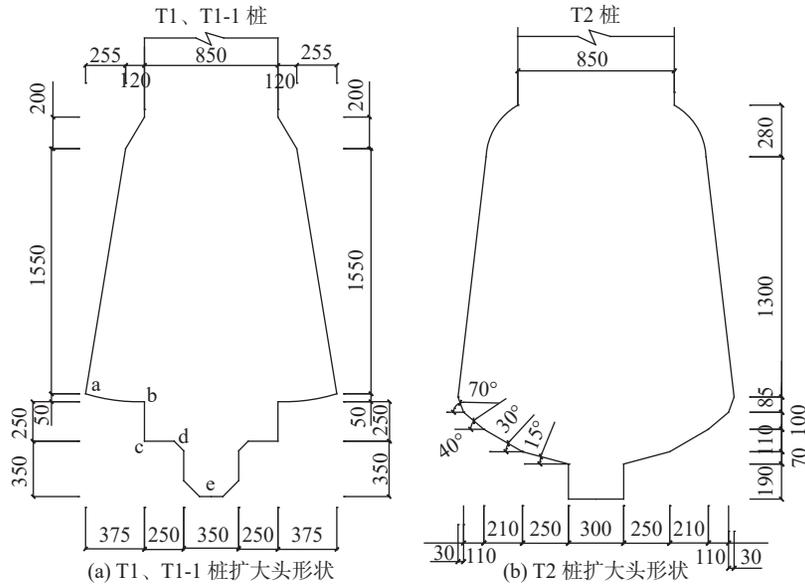


图 2 扩大头形状(单位:mm)

表 2 试验桩主要施工参数

桩号	设计桩径/mm	扩大头直径/mm	桩长/m	充盈系数	沉渣厚度/mm	扩底率	清渣方式	成桩时间/h
T1	850	1600	55.00	1.17	45	1.88	正循环	75
T2	850	1500	53.55	1.13	35	1.76	泵吸反循环, 并配置泥浆除砂器, 优化泥浆质量	83
T3	850		57.03	1.15	30		泵吸反循环	68.5

1.3 试验内容

为分析研究机钻扩底灌注桩荷载传递特性, 2 根扩底试验桩桩身埋设应变式传感器, 并量测桩端位移; 在静荷载之前, 经对 3 根试验桩进行声波检测, 其桩身混凝土完整性均为完整。

2 试验桩测试结果

2.1 单桩静载荷试验结果

根据单桩静载荷试验结果, 绘制  $Q-s$ 、 $Q-s_b$  曲线分别见图 3、图 4, 并根据曲线确定各试验桩单桩极限承载力, 其中 T1-1 桩为 T1 桩加载到可以确定极限承载力后, 停止试验, 并进行桩底高压注浆, 待注浆体强度达到龄期后, 再进行静载荷试验, 其各桩静载荷试验结果见表 3。

从图 3 可以看出, 在地质条件相近、持力层相同

情况下, 同直径钻孔扩底桩单桩承载力较直桩小, 说明扩底桩承载力偏低是由于存在非桩身混凝土强度

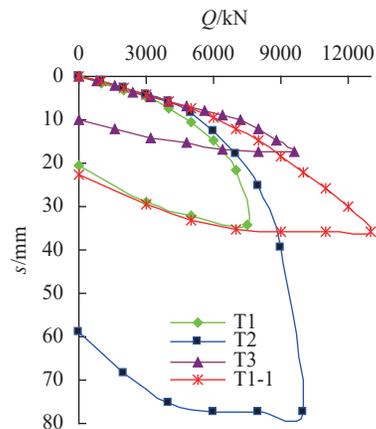


图 3  $Q-s$  曲线

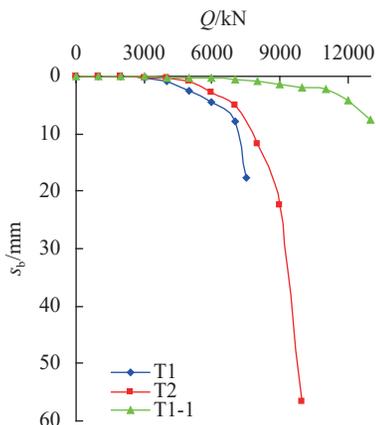


图4 Q-s<sub>b</sub>曲线

缺陷引起;同时 T1-1 桩试验结果表明,引起扩底桩承载力偏低的缺陷可以通过桩底高压注浆得到部分弥补。

2.2 桩身应力测试结果

为了解扩底桩荷载传递,在桩身主要位置进行轴力测试,桩身轴力分布图见图5。扩底桩应力测试结果整理是假设直桩变径处以下扩大头部分桩侧摩阻力为零,即变径处测得轴力即为扩大头端阻力。同

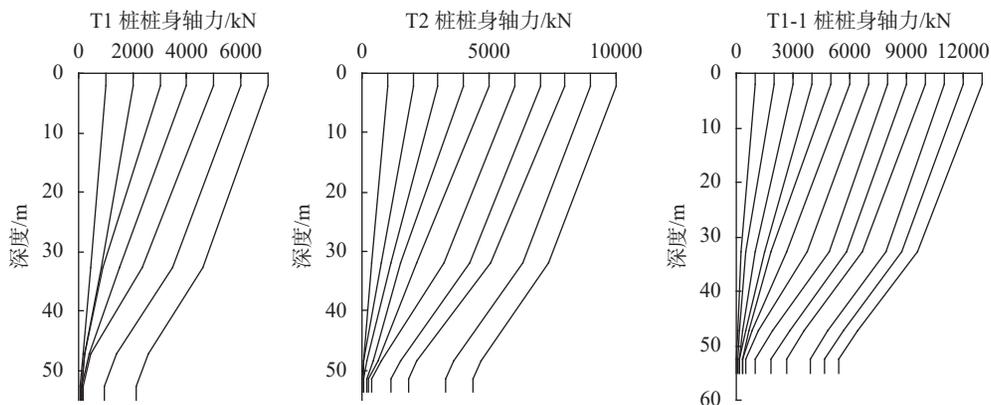


图5 桩身轴力分布图

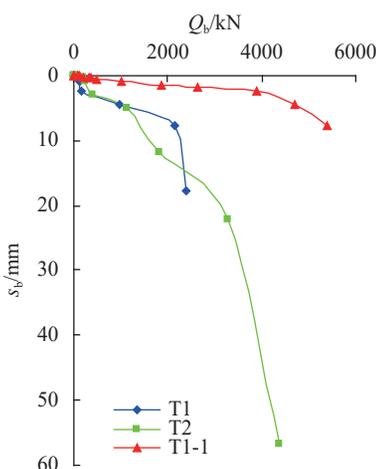


图6 Q<sub>s</sub>-s<sub>b</sub>曲线

表3 静载试验结果

桩号	最大加荷量/kN	最大荷载下总沉降量/mm		单桩承载力极限值/kN	极限值对应沉降量/mm	
		桩顶	桩端		桩顶	桩端
T1	7500	34.26	17.64	7000	21.43	7.79
T2	10000	77.40	56.65	9000	39.33	22.30
T3	9600	17.46		≥9600	≥17.46	
T1-1	13000	35.84	7.69	≥13000	≥35.84	≥7.69

注: T1-1桩为T1桩第一次静载后经桩底高压灌浆加固。

时根据实测桩端阻力 Q<sub>b</sub> 和桩端位移 s<sub>b</sub>, 绘制 Q<sub>b</sub>-s<sub>b</sub> 曲线见图6。

根据图6曲线, T1、T2、T1-1 桩桩端阻力极限值分别 1061 kPa、1861 kPa、≥2676 kPa, 尽管 3 根桩桩端位于同一持力层, 但其桩端阻力发挥极限值差异较大。从图4和图6中 T1、T2 桩相应曲线来看, 在较大荷载作用下桩端位移量很大, 明显产生刺入变形, 而经过桩底高压注浆 T1-1 桩, 桩端位移量明显变小, 说明桩底是否存在沉渣或泡水软化影响桩端位移, 直接影响桩端承载能力。

2.3 桩侧摩阻力

根据桩身应力测试结果, 绘制各应力测试段的平均桩侧摩阻力 q<sub>s</sub> 与桩土之间相对位移 δ 曲线见图7, 从图7曲线得到各应力测试段的平均桩侧极限摩阻力见表4。

从表4可以得出四点规律: (1) T1-1 桩桩侧极限摩阻力较 T1 桩明显提高, 且从桩顶至变径处提高幅值逐渐变大, 尤其是在 47.30 ~ 52.60 m 测试段桩侧极限摩阻力成倍提高, T2 桩也有类似 T1-1 桩变化规律, 仅是提高幅值稍小而已; (2) 桩端阻力极限值越低, 与之相对应桩侧极限摩阻力发挥值也越低, 说明桩端阻力发挥正常与否直接影响桩侧摩阻力发挥, 但远离扩大头变径处 3.0 m 以上部分即桩身中部及以上部

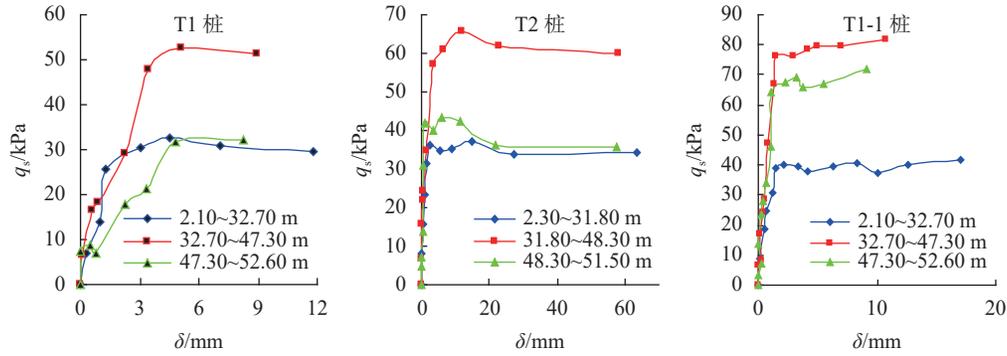


图7  $q_s$ - $\delta$  曲线

表4 实测桩侧极限摩阻力

深度/m	桩侧极限摩阻力/kPa		深度/m	桩侧极限摩阻力/kPa
	T1桩	T1-1桩		T2桩
2.10 ~ 32.70	30	40	2.30 ~ 31.80	35
32.70 ~ 47.30	50	75	31.80 ~ 48.30	60
47.30 ~ 52.60	32	65	48.30 ~ 51.50	42

分, 桩侧摩阻力发挥值受桩端阻力发挥影响逐渐降低, 甚至完全消失; (3) 扩大头变径处以上相邻测试段桩侧土层性质相同, 但所测桩侧摩阻力值相差较大, 靠近扩大头变径处桩侧摩阻力明显降低; (4) 同一土层, 其桩侧摩阻力发挥值为非定值, 且变化较大。

### 3 钻孔扩底桩承载力偏低原因分析

根据国内外报道的相关研究资料, 扩底桩与桩身直径相同的直桩相比, 其承载力可提高 1.5 ~ 4.0 倍。本工程单桩载荷试验结果表明: 直径相同的直桩承载力反而较扩底桩高; 扩底直径大的 T1 桩承载力较扩底直径小的 T2 桩小; 相同持力层扩底桩桩端阻力发挥极限值差异大, 且桩端阻力发挥极限值仅为桩底高压注浆扩底桩 (T1-1 桩) 40% ~ 70%; T1、T2 桩桩端明显产生刺入变形, 而经桩底高压注浆后 T1-1 桩桩端位移量明显变小, 呈缓变形。

由于静载试验前, 声波透射法检测显示扩底桩桩身混凝土完整, 因此可以判断钻孔扩底桩承载力偏低的主要原因应为过厚沉渣及砂土状强风化岩持力层泡水软化。

#### 3.1 扩大头形状对清渣和持力层泡水软化影响

为保证桩底清渣效果, 一般关注泥浆质量和清渣方式, 这也是钻孔灌注桩直桩施工中, 施工质量把控关键点。本次钻扩桩施工过程中, 非常注意对泥浆质量和清渣方式把控, 但最终试验结果还是失败, 经分析扩大头形状可能是影响桩底清渣彻底与否的直接原因, T1-1 桩桩底高压注浆后单桩承载力明显提

高也证明了桩底确实存在较厚沉渣或砂土状强风化岩持力层泡水软化等缺陷存在。

图 2(a) 扩大头中, ab 段倾斜较缓, cd 段水平, 易在 a 处、c 处及导向孔 e 处形成沉渣堆积, 其中 a 处和 e 处清渣难度更大, 同时还存在 b 处及 d 处阳角, 砂土状强风化岩泡水更易软化, 因这些问题可能单独存在, 也可能两种或两种以上组合存在, 其对桩端阻力发挥影响很大; 根据实测的桩端阻力极限值分析, 经改进后图 2(b) 扩大头形状比改进前图 2(a) 扩大头形状更有利于桩端阻力发挥, 说明改进后扩大头形状有利于清渣, 但仍然存在导向孔处清渣困难和阳角泡水软化问题。必须指出, 两种扩大头在桩底中心处都有一个导向孔, 导向孔直径分别为 350 mm、300 mm, 深度分别为 350 mm、190 mm, 极易充满沉渣, 因孔径小, 不管采用何种形式清渣工艺, 导向孔都是清渣死角, 清渣极其困难。

#### 3.2 桩底缺陷影响扩底桩桩端阻力发挥分析

显而易见, 桩底缺陷对钻孔灌注桩桩端持力层正常发挥有直接影响。当桩端土体受力后, 土体以向下位移为主, 桩底缺陷严重时桩端明显产生刺入变形, 随着应力增加土体压缩挤密作用, 桩底土体除了向下位移外, 也会向桩端四周挤压变形, 其挤压变形逐渐波及桩端以上一定范围内, 但由于钻扩桩扩大头最大横截面以上存在斜面接触, 其接触斜面将会随着桩端位移增加逐渐产生脱空现象。

图 8 为扩底桩斜面脱空和土体变形趋势示意图, 由于脱空现象逐渐产生, 其扩大头与土体接触斜面的土体变形受约束减少, 直到完全脱空土体不受约束, 这有利于桩端持力层土体受压缩挤密后向四周变形, 与直桩相比, 更加不利于桩端阻力发挥。因此, 这一特点决定桩底沉渣或桩端持力层泡水软化对扩底桩桩端阻力发挥影响尤为明显。

#### 3.3 桩底缺陷影响扩底桩桩侧摩阻力发挥分析

众所周知, 桩侧摩阻力发挥值与桩周土层性质

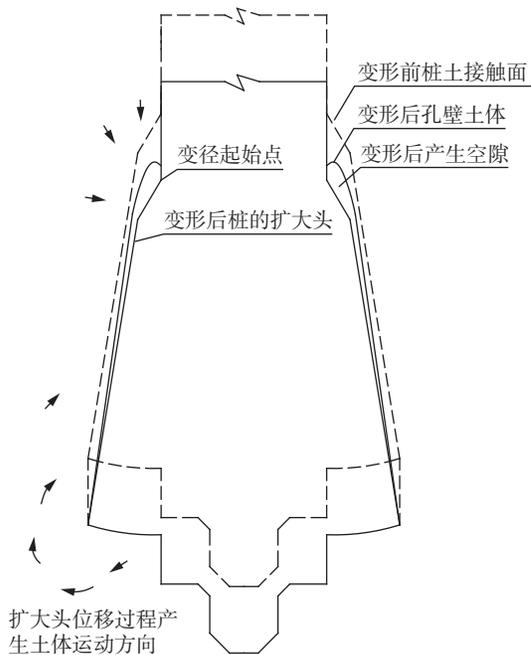


图8 扩底桩斜面脱空和土体变形趋势示意图

最为直接相关。对于直桩而言,一旦桩顶受荷桩身向下位移,桩周土体也随之向下位移,土体挤压,强度随之增加,桩侧摩阻力也相应增大。但对扩底桩桩身变径起始点以上一定范围内,桩周土体向下位移,桩侧摩阻力反而产生降低。产生原因主要是由于变径处以下桩土接触面呈“八”字喇叭状,桩身向下位移易出现桩土接触面应力降低,尤其桩底存在严重缺陷时,桩身会产生较大向下位移,桩土接触面处甚至可能出现脱空现象,变径处以上一定范围桩周土体受桩身向下位移的拖曳挤压,由于扩大头对周围土体约束减少甚至不约束,从而引起桩周土体强度降低或松动,径向应力随之降低,明显产生桩侧摩阻力弱化现象。

#### 4 结论

(1)扩底桩沉渣对承载力的影响较为敏感。而桩底清渣效果除了与泥浆比重、清渣工艺有关外,还受制于扩大头形状。扩大头形状设计要做到易于清渣,不留清渣死角和导致持力层容易泡水软化角。

(2)应力测试结果表明:同一土层的桩侧极限摩阻力发挥值为非定值,受桩底沉渣和持力层泡水软化影响,极限摩阻力发挥值发生弱化效应。桩底沉渣越厚和持力层泡水软化越严重,其弱化效应越明显。

(3)对于同一根试桩同一土层,变径起始点以上3 m范围内,桩侧极限摩阻力发挥值较距变径起始点3 m处以上低15%~40%,桩基设计时应予以考虑。

(4)砂土状强风化岩具有遇水软化、崩解特性,其特性在扩底桩底部以及扩大头形状较为复杂情况下表现尤为明显,对扩底桩承载力影响更加突出,可

以通过桩底高压注浆加固部分消除这一特性影响,加固后承载力提高幅值应通过静载荷试验。

(5)本次对持力层为砂土状强风化岩的扩底桩试验研究,即使未能完全达到设计预期目的,但得到一些荷载传递方面新认识,取得一些经验,对今后相似扩底桩进一步研究有一定参考价值。

#### 参考文献

- [1] 高广运,蒋建平,顾宝和.同场地扩底桩和直桩的对比研究[J].*岩石力学与工程学报*,2005,24(3):502-506.
- [2] 陈永贵,周德泉,毛广凌.钻孔扩底灌注桩的承载性状与设计计算[J].*建筑技术*,2008,39(12):957-959.
- [3] 蒋建平,高广运.桩单位体积承载力问题探讨[J].*工业建筑*,2006,36(9):43-46.
- [4] 蒋建平,高广运,顾宝和.扩底桩、楔形桩、等直径桩对比试验研究[J].*岩土工程学报*,2003,25(6):764-766.
- [5] 李大展,滕延京,何颐华,等.湿陷性黄土中大直径扩底桩垂直承载性状的试验研究[J].*岩土工程学报*,1994,16(2):11-21.
- [6] 高广运,蒋建平,顾宝和.砂卵石层上大直径扩底桩墩竖向承载力性状[J].*岩土力学*,2004,25(3):359-362.
- [7] 蒋建平,高广运,顾宝和.砂卵石层上大直径扩底墩荷载传递性状研究[J].*工程勘察*,2003,30(5):5-7.
- [8] 武敏刚,黄挺,戴国亮,等.嵌岩扩底桩抗压承载性能分析及试验研究[J].*建筑结构*,2007,37(S1):678-681.
- [9] 文松霖.扩底桩桩端承载机制初探[J].*岩土力学*,2011,(7):1970-1974.
- [10] 王凤池,王明恕.大直径扩底桩墩的工作机理和承载力设计[J].*岩土工程学报*,2002,24(2):251-253.
- [11] 胡庆红,谢新宇.深长大直径扩底灌注桩承载性能试验研究[J].*建筑结构学报*,2009,(4):151-157.
- [12] 林志强.深厚强风化岩层冲孔灌注桩质量问题原因分析[J].*工程勘察*,2019,47(11):23-28.
- [13] 李锦福.关于福建某工地砂土状强风化岩遇水软化承载力下降的研究[J].*四川水泥*,2021,(6):320-321.
- [14] 董金荣.灌注桩侧阻力强化弱化效应研究[J].*岩土工程学报*,2009,31(5):658-662.
- [15] 席宁中.试论桩端土强度对桩侧阻力的影响[J].*建筑科学*,2000,16(6):51-60.
- [16] 袁振,陈锦剑,王建华.桩端条件对灌注桩荷载传递特性的影响[J].*岩土力学*,2006,27(8):1398-1402.
- [17] 席宁中,刘金砺,席婧仪.桩端土刚度对桩侧阻力影响的数值分析[J].*岩土工程学报*,2011,(S2):174-177.
- [18] 张公略,王保田,李守德.桩端土层条件对桩侧阻力影响的探讨[J].*山西建筑*,2005,31(23):73-74.