

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0895-06

刚性桩和柔性桩荷载传递性状的比较

朱 奎¹, 徐日庆¹, 苏晓樟², 周鹏飞²

(1. 浙江大学 土木工程学系, 杭州 310027; 2. 温州大学, 温州 325000)

摘 要: 为了比较刚性桩和柔性桩的荷载传递规律, 在温州地区选择了钻孔灌注桩和水泥搅拌桩进行静荷载试验。试验前在钻孔灌注桩桩身埋设了钢筋应力计, 在水泥搅拌桩桩身埋设了振弦式应变计。在静荷载试验过程中同步检测传感器的变化情况, 根据试验成果对两种不同类型桩进行对比分析, 得出一些有益的结论, 供工程设计施工人员参考。

关 键 词: 刚性桩; 柔性桩; 荷载传递机理; 承载力; 沉降

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Comparative research on load transfer behavior of rigid pile and flexible pile

ZHU Kui¹, XU Ri-qing¹, SU Xiao-zhang², ZHOU Peng-fei²

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Wenzhou University, Wenzhou 325000, China)

Abstract: In order to compare with load transfer mechanism of rigid pile and flexible pile, static load test of cast-in-place pile and cement mixing pile is carried out. Stress meters are embedded along cast-in-place pile shaft and strain meters are embedded along cement mixing pile shaft. Sensors are monitored in the process of static load test. Different types of piles are analyzed and obtain some meaningful conclusions good for design and construction are drawn.

Key words: rigid pile; flexible pile; load transfer mechanism; bearing capacity; settlement

1 引 言

当地基强度和变形不能满足上部建筑物承载和变形要求时, 通常采用桩来改善地基特性。根据桩体材料不同, 工程界将桩按照材料刚度分为刚性桩和柔性桩^[1]。严格地讲, 桩体的刚度不仅与材料的性质有关, 还与桩的长径比有关, 应采用桩土相对刚度来描述^[2]。目前比较常见的刚性桩有钻孔灌注桩、沉管灌注桩、预应力管桩; 应用较广泛的柔性桩有水泥搅拌桩、粉喷桩。由于不同刚度桩的荷载受力特性有较大差别, 从而承载能力和控制沉降能力出现差异。为了比较两种不同类型桩的荷载传递规律和工作机制, 笔者分别在多根钻孔灌注桩和水泥搅拌桩埋设了传感器, 下面根据典型桩试验结果进行对比分析。

2 试验概况

试验场地位于温州市新桥镇西堡锦园, 刚性桩采用温州地区常用的人力简易钻孔灌注桩, 桩长 44 m, 桩径为 500 mm, 桩混凝土强度等级为 C20, 内配 6 Φ 12 mm 通长布置的钢筋。由于这类桩沉渣厚度不易控制, 桩端承作用几乎没有, 可归类为纯摩擦桩。地质报告提供的承载力特征值为 492 kN。水泥搅拌桩桩长选用 13.5 m, 桩径为 500 mm。采用水泥变掺量施工方法, 即上部 1/3 (0~4.5 m) 处复搅拌一次, 水泥掺量比为 18 %, 下部 2/3 (4.5~13.5 m) 处水泥掺量比为 12 %。地质报告提供的承载力特征值为 110 kN。试验前对钻孔灌注桩进行低应变检测, 对水泥搅拌桩进行静力触探检测, 发现两种桩质量良好。场地土具有典型温

收稿日期: 2007-06-19

基金项目: 浙江省建设厅科研项目(No. 20050568); 温州市科技技术局资助社会发展项目(No. S2005A013); 温州市瓯海区科技技术局资助社会发展课题(No. 200522)

作者简介: 朱奎, 男, 1975 年生, 博士, 主要从事复合地基和桩基方面的研究。E-mail: wzzhukui@sina.com

州深厚软土分布特征, 土物理力学性质指标见表 1。值得注意的是, 本文选用的刚性桩为小直径摩擦长桩, 其他类型刚性桩与此可能有一定差别, 但总体上不影响刚性桩和柔性桩的规律性对比。

表 1 土物理力学性质指标
Table 1 Physical and mechanical properties of soils

层序	土层名称	层厚/m	W /%	ρ / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	e_0	W_L /%	W_P /%	I_P	I_L	E_s /MPa
①	杂填土	1								
②	粉质黏土	2	29.6	1.86	0.902	43.0	26.7	16.3	0.478	3.71
③-1	淤泥	11	79.2	1.51	2.272	61.0	36.5	24.5	1.743	0.91
③-2	淤泥	8	58.4	1.64	1.646	57.0	38.0	19.0	1.074	1.57
④	淤泥质黏土	8	48.7	1.71	1.383	47.0	29.0	18.0	1.058	3.66
⑤	粉质黏土	8	39.3	1.81	1.101	44.0	27.0	17.0	0.724	5.25
⑥	粉砂	9	21.9	1.90	0.726					8.70

3 试验方法

3.1 竖向抗压静荷载试验

静荷载试验采用慢速维持荷载法, 采用砂包压重反力装置。钻孔灌注桩总荷载为 1 082.4 kN, 分级荷载为 98.4 kN。水泥搅拌桩总荷载为 242 kN, 分级荷载为 22 kN。每级荷载施加后按 5, 15, 30, 45, 60 min 测读桩顶沉降量, 以后每隔 30 min 测读一次。试桩沉降相对稳定标准: 在每级荷载作用下桩顶沉降量连续两次在每小时内不超过 0.1 mm, 可视为稳定。

3.2 桩身轴力及侧摩阻力的测试

通过钻孔灌注桩桩身埋置钢弦式钢筋应力计来测量刚性桩的轴力和摩阻力。钢筋应力计根据土质和深度进行放置, 各断面自上而下分别为 0, 2, 13.5, 20, 28, 36, 44 m。水泥搅拌桩弹性模量较低, 埋置钢筋应力计易引起应力集中, 使试验结果失真, 故在水泥搅拌桩身埋置振弦式应变计。水泥搅拌桩埋设各断面自上而下分别为 0, 2, 4, 8, 13.5 m。根据桩顶测试结果与千斤顶的每次加荷相对照, 发现误差小于 6%, 表明本次试验的可靠性。

4 结果与试验分析

4.1 桩的荷载-沉降特性

图 1 为钻孔灌注桩的 Q - S 曲线和 S - $\lg t$ 曲线。图 2 为水泥搅拌桩的 Q - S 曲线和 S - $\lg t$ 曲线。从图中可知, 二者 Q - S 曲线均呈陡降型, 在极限荷载下均有明显的拐点。二者 S - $\lg t$ 曲线在极限荷载下均出现不稳定迹象, 在破坏荷载时都出现持续变化。但不同的是钻孔灌注桩 S - $\lg t$ 曲线趋向于稳

定, 水泥搅拌桩沉降量随时间延长一直在增大。由此可见, 二者 Q - S 曲线在破坏荷载下都呈现出陡降特征, 进入破坏状态, 但破坏模式存在很大的不同, 钻孔灌注桩破坏原因在于破坏荷载大于桩周土摩阻力, 而桩端持力层性质差, 在破坏荷载下桩土相对位移大, 桩端土发生剪切破坏, 形成“刺入式”破坏。水泥搅拌桩破坏模式则为桩体本身的破坏。在破坏荷载作用下, 水泥搅拌桩应变超过极限状态, 桩体出现局部压碎破坏, 水泥搅拌桩丧失承载能力, 故水泥搅拌桩回弹量相当小, 回弹率仅为 7.1%, 而钻孔灌注桩回弹率为 19.2%。两种桩的 Q - S 曲线均表现出 3 折线特征, 可划分 3 个阶段:

(1) 弹性阶段。 Q - S 曲线斜率较小, 可描述为线性。

(2) 弹塑性阶段。 Q - S 曲线斜率明显加快, 呈现出非线性特征。钻孔灌注桩承载力特征值可确定为 492 kN, 相应沉降量为 2.72 mm。水泥搅拌桩承载力特征值可判定为 110 kN, 相应沉降量为 6.67 mm, 比钻孔灌注桩对应沉降量增大 1.45 倍。

(3) 塑性破坏阶段。 Q - S 曲线出现陡降, 沉降急剧增大。钻孔灌注桩破坏荷载所对应总沉降量为 15.45 mm, 本级沉降量为 5.64 mm。水泥搅拌桩破坏荷载所对应总沉降量为 34.16 mm, 是钻孔灌注桩破坏荷载时沉降量的 2.2 倍, 本级沉降量为 10.73 mm。

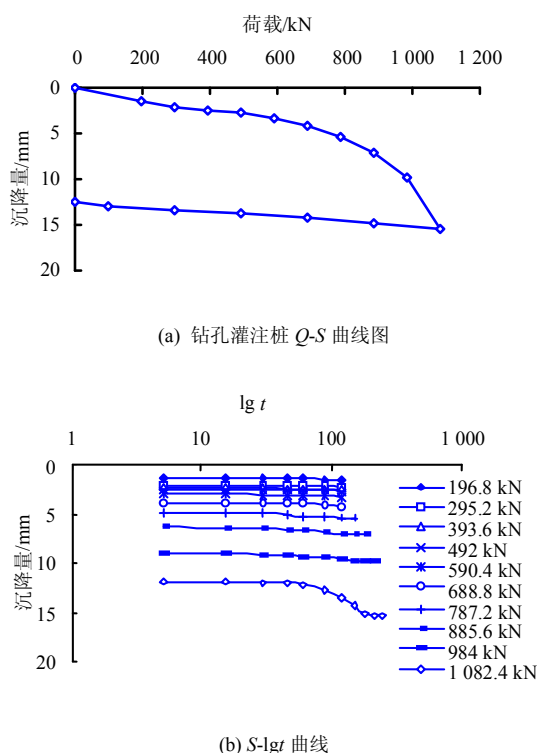


图 1 钻孔灌注桩 Q - S 和 S - $\lg t$ 曲线
Fig.1 Q - S and S - $\lg t$ curves of cast-in-place pile

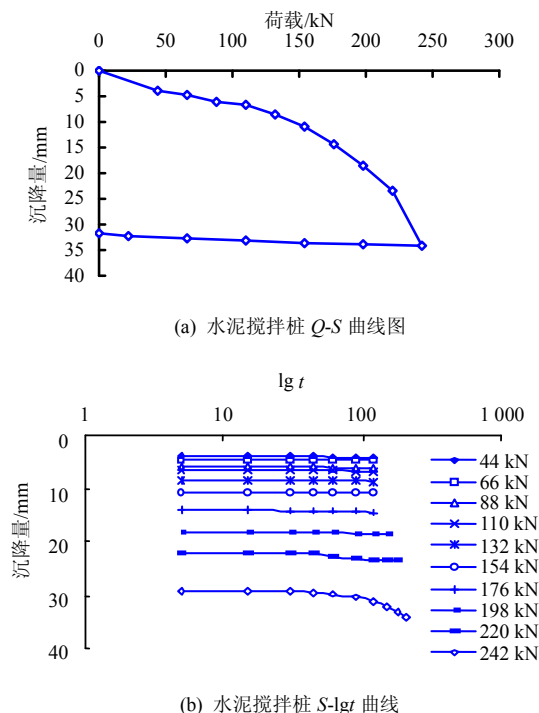


图 2 水泥搅拌桩 Q-S 和 S-lg t 曲线
Fig.2 Q-S and S-lg t curves of cement mixing pile

4.2 桩轴力分布性状

图 3 为桩轴力图。图 3(a)显示, 钻孔灌注桩轴力在顶部达到最大值, 沿桩身从上至下逐渐衰减, 桩底轴力为 0, 表明桩端承力为零。在小级别荷载作用下, 轴力衰减斜率接近于直线, 随着荷载的增

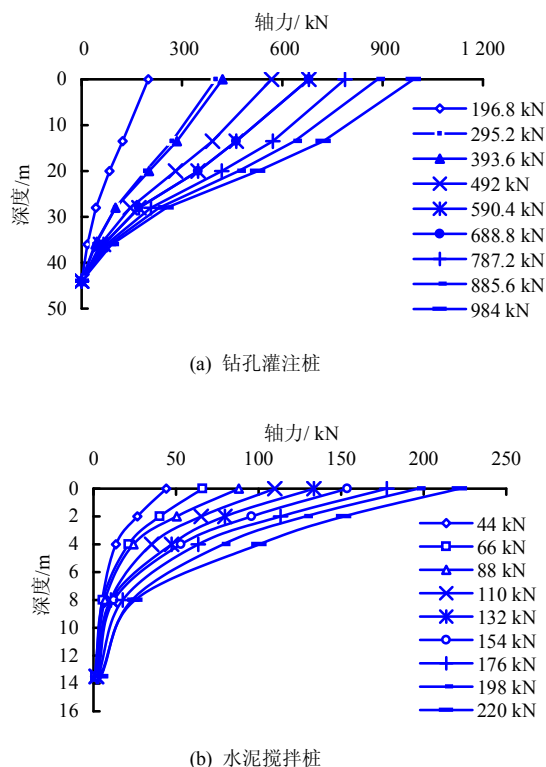


图 3 桩身轴力分布图

Fig.3 Axial force distribution of cement mixing pile

加, 桩中部衰减速度加快, 轴力沿深度分布曲线呈 S 形。水泥搅拌桩桩底轴力亦为 0, 低荷载水平时不同部位轴力衰减速率相差不大。与钻孔灌注桩不同点在于: 随荷载增大, 上部轴力衰减速率明显加快, 增大到一定程度后轴力衰减斜率大致相同, 表明摩阻力已达到极限状态。

为了便于说明问题, 对钻孔灌注桩和水泥搅拌桩轴力曲线进行抛物线拟合。

钻孔灌注桩承载力特征值所对应的轴力曲线为

$$y = 0.0184x^2 - 12.839x + 506.24 \quad (1)$$

拟合方差为 0.9865。

水泥搅拌桩轴力曲线为

$$y = 0.9282x^2 - 20.119x + 105.66 \quad (2)$$

拟合方差为 0.9876。并根据拟合曲线绘制了表 2, 给出了桩身不同部位轴力与最大轴力的比值。

表 2 桩身不同部位轴力与最大轴力的比值

Table 2 Ratio between axial force of different area along pile shaft and maximum axial force

部位	$(N_1/N) / \%$								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
钻孔桩深度/m	37.7	33.4	29.2	25.0	20.9	16.9	12.8	8.9	5.0
搅拌桩深度/m	6.9	5.6	4.6	3.7	2.9	2.2	1.5	0.9	0.3

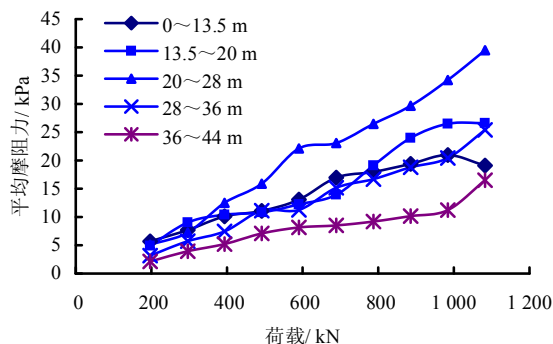
从表 2 可知, 钻孔灌注桩和水泥搅拌桩从承载力角度均存在有效桩长, 以最大桩顶轴力的 10% 为有效桩长, 则钻孔灌注桩有效桩长为 37.7 m, 水泥搅拌桩有效桩长为 6.9 m。应该指出, 有效桩长与桩土刚度比、桩周土的特征及桩端情况有关, 本文分析的钻孔灌注桩为小直径纯摩擦长桩。

4.3 桩侧摩阻力

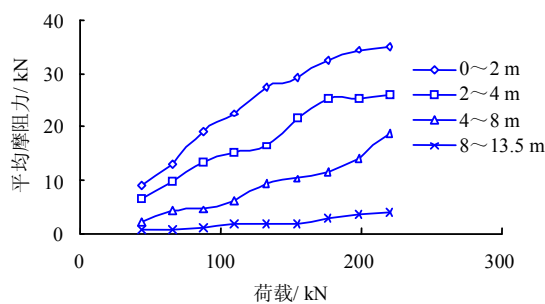
4.3.1 不同荷载下平均摩阻力沿深度分布情况。

钻孔灌注桩中部摩阻力发挥最充分, 下部摩阻力较难发挥, 这与土质层分布、上覆重量以及桩土相对位移有关。另外, 承载力特征值前不同部位摩阻力接近, 可近似看作矩形分布。与此相对, 水泥搅拌桩平均摩阻力由上至下依次变小, 摩阻力沿桩身分布形状可模拟为倒三角形。顺便指出, 承载力特征值时单桩沿桩身分布形式有较大的价值。一些学者为相对准确计算地基沉降, 尝试应用 Geddes 公式进行计算^[4], 但由于桩侧摩阻力分布的不确定性而难以实施, 本次试验成果无疑提供了有益的参考。此外, 图 4 反映当应力超过极限荷载时上部桩侧摩阻力出现软化现象, 即桩侧摩阻力随

荷载增大反而减少。这是由于温州软土具有结构性^[4], 当外部应力低于结构屈服强度时, 应力-应变关系呈“硬化型”, 当外部应力高于结构屈服强度时, 应力-应变关系呈“软化型”。



(a) 钻孔灌注桩



(b) 水泥搅拌桩

图 4 桩侧摩阻力分布图

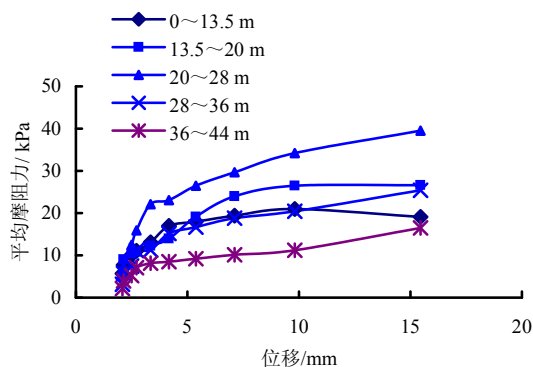
Fig.4 Lateral friction resistance distribution

4.3.2 摩阻力与沉降关系

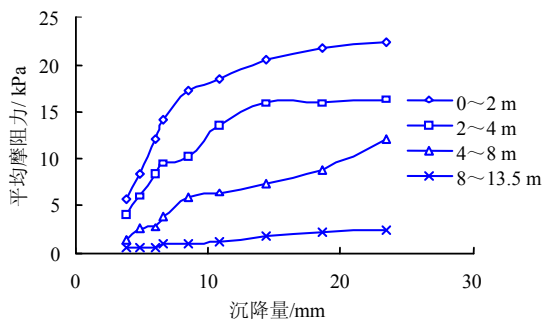
摩阻力的发挥与桩相对位移直接相关, 图 5 为桩身侧摩阻力与沉降关系图, 从图中可以发现两种桩共同规律: 位移较小时桩上部摩阻力增长较快, 下部摩阻力增长较慢, 摩阻力从上至下逐渐发挥。随着位移增加, 钻孔灌注桩上部和下部摩阻力增长相对缓慢, 中部摩阻力增长较快, 28~36 m 区段摩阻力为最大值。主要原因是该区段土质较上部土质硬, 桩土界面提供的摩阻系数较大。36~44 m 以下土质更硬, 桩土极限摩阻力似乎更大, 但测试结果却相反。出现这种状态主要是由于 36~44 m 的桩土相对位移很小, 摩阻力不能充分发挥。随位移增加, 水泥搅拌桩上部摩阻力迅速发挥, 在位移值较大时摩阻力曲线变化斜率接近于 0, 表明摩阻力已达到极限值。桩下部摩阻力很小并且趋于水平线, 这是由于受桩身强度和刚度限制桩土相对位移小, 摩阻力发挥程度不大。

从曲线形状来看, 钻孔灌注桩平均摩阻力在沉降值为 2.7 mm 处出现拐点, 呈现出非线性特征, 说明桩应力-应变进入了弹塑性状态。而水泥

搅拌桩在沉降值为 6.67 mm 时出现拐点, 水泥搅拌桩摩阻力发挥所需要的桩顶位移值比钻孔灌注桩要大得多。



(a) 钻孔灌注桩



(b) 水泥搅拌桩

图 5 桩身侧摩阻力与沉降关系图

Fig.5 The relationship between lateral friction resistance and settlement of cement mixing pile

5 桩身弹性压缩量分析

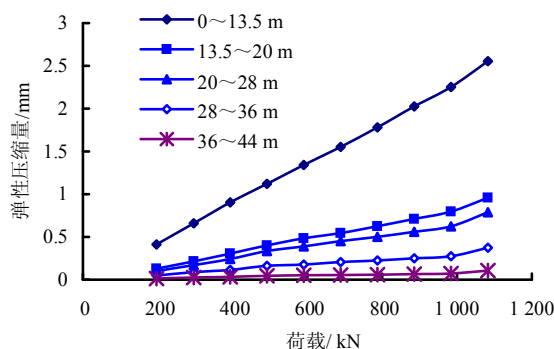
5.1 桩身弹性压缩量沿深度分布规律

桩身弹性压缩量:

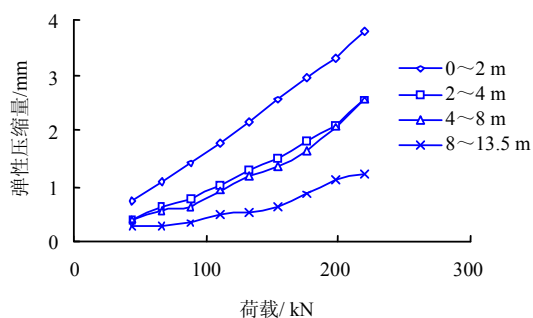
$$S_t = \int_0^l N_{iz} / (E_{gh} A) dz = \sum_{i=1}^n [(N_i + N_{i+1}) l_i / 2 E_{gh} A] \quad (3)$$

式中: N_i 为 i 截面轴力; N_{i+1} 为 $i+1$ 截面轴力; l_i 为两截面间的距离; E_{gh} 为钢筋混凝土弹性模量; A 为桩横截面面积。

根据式 (3) 可得出桩身弹性压缩量沿深度随荷载变化曲线, 如图 6 所示。两种桩共同点在于浅部弹性压缩量占桩身弹性压缩量比例较大, 这是由于上部轴力较大所致。图 6(a)显示钻孔灌注桩 0~13.5 m 区域的弹性压缩量在各级荷载作用下占总压缩量的百分比为 57%~54%, 桩底部位移小, 36~44 m 区域最大值仅 0.07 mm, 而且随荷载增加波动不大, 这和摩阻力发挥性状相符。图 6(b)表明, 水泥搅拌桩 0~2 m 区域的弹性压缩量最大, 2~4 m 区域和 4~8 m 区域的弹性压缩量大致相当, 8~13.5 m 弹性压缩量最小。承载力特征值时 0~2 m 弹性压缩量占总弹性压缩量的 42%,



(a) 钻孔灌注桩



(b) 水泥搅拌桩

图 6 弹性压缩量随荷载变化沿深度分布曲线

Fig.6 Elastic compress distribution with load variation

是 2~4 m 弹性压缩量的 1.74 倍、4~8 m 弹性压缩量的 1.92 倍、8~13.5 m 弹性压缩量的 3.69 倍。由此可见，0~2 m 水泥土应变远远超过其他部位，水泥搅拌桩易在 0~2 m 区域发生破坏。

5.2 桩顶沉降量与弹性压缩关系

为了更直观分析，绘出弹性压缩量和沉降量随荷载变化图，如图 7 所示。从图中看出，二者特性类似，在承载力特征值作用前，弹性压缩量和沉降量相当接近。随着荷载增加，二者分离态势越来越大。这种现象说明，加载低于承载力特征值时，沉降量主要表现为弹性压缩量，此后弹性压缩量占沉降量的比例越来越小，桩逐渐从弹性阶段过渡至弹塑性阶段。水泥搅拌桩弹性压缩量和沉降量比值比钻孔灌注桩大。

5.3 桩身不同部位压缩量与深度的关系

为了进一步揭示桩身各断面弹性压缩位移 S_h 与深度的关系，现求出荷载作用下 S_h 和总压缩变形量 S 的比例，并通过曲线拟合手段与 h 建立关系。由于用抛物线方程来拟合该曲线误差较大，故采取精度较高的 3 次方程来拟合该曲线。图 8 为 S_h/S 和深度 h 关系曲线图。

钻孔灌注桩在承载力特征值时拟合方程为

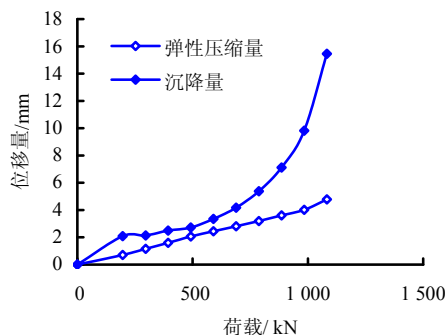
$$S_h/S = -2 \times 10^{-7} x^3 + 0.0006 x^2 - 0.0503 x + 1.0025 \quad (4)$$

拟合方差为 0.9989。

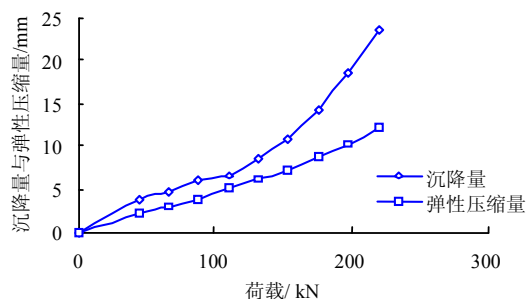
水泥搅拌桩在承载力特征值时拟合方程为

$$S_h/S = -0.0008 x^3 + 0.0242 x^2 - 0.2512 x + 0.997 \quad (5)$$

拟合方差为 0.9998。



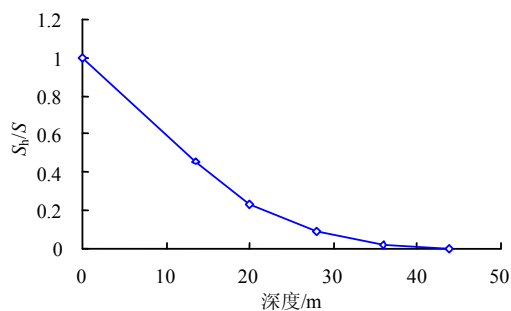
(a) 钻孔灌注桩



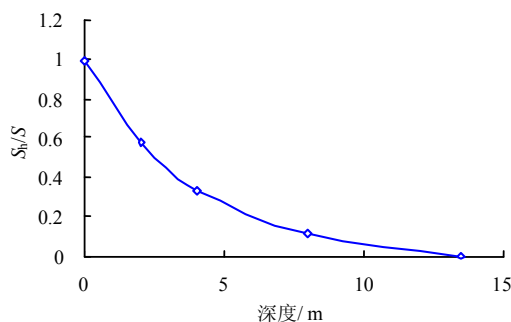
(b) 水泥搅拌桩

图 7 沉降量与弹性压缩量关系图

Fig.7 The relationship between settlement and elastic compression



(a) 钻孔灌注桩



(b) 水泥搅拌桩

图 8 S_h/S 和深度关系曲线Fig.8 The relationship between S_h/S and depth

根据上述方程列于表 3。由于水泥搅拌桩弹性模量比钻孔灌注桩低得多,水泥搅拌桩比钻孔灌注桩荷载传递能力强得多。以 10 %为对比依据,钻孔灌注桩桩身压缩变形主要发生在 25.7 m 内,水泥搅拌桩桩身压缩变形主要发生在 10.8 m 内。

表 3 桩身不同部位弹性压缩变形和总压缩变形的比值
Table 3 The relationship between elastic compression and total compression of pile shaft

参数	$(S_1/S)/\%$								
	10	20	30	40	50	60	70	80	90
钻孔桩深度 /m	25.7	21.4	17.6	14.5	11.6	8.90	6.50	4.30	2.20
搅拌桩深度 /m	10.8	5.8	4.3	3.3	2.5	1.9	1.4	0.9	0.4

6 结 论

(1) 钻孔灌注桩和水泥搅拌桩 $Q-S$ 曲线均为陡降型,但两者发生原因不同,钻孔灌注桩是由桩端刺入破坏引起的,是由桩土受力体系失效引起的;而水泥搅拌桩则是由桩身水泥土破坏导致的。

(2) 钻孔灌注桩和水泥搅拌桩轴力衰减规律不同。钻孔灌注桩轴力最大衰减率发生在中部,而水泥搅拌桩最大衰减率出现在上部。

(3) 钻孔灌注桩和水泥搅拌桩从承载力角度均存在着有效桩长,钻孔灌注桩有效桩长远大于水

泥搅拌桩。

(4) 当应用 Geddes 公式计算地基沉降时,钻孔灌注桩桩侧摩阻力分布可采用矩形,水泥搅拌桩桩侧摩阻力分布可采用倒三角形。

(5) 水泥搅拌桩摩阻力发挥所需要的位移值比钻孔灌注桩摩阻力发挥所需要的位移值大。

(6) 钻孔灌注桩和水泥搅拌桩桩身弹性压缩量主要集中在浅部,水泥搅拌桩在这方面特征尤为明显。

(7) 钻孔灌注桩比水泥搅拌桩刚度大许多,因此,前者比后者荷载传递能力明显增强,但钻孔灌注桩比水泥搅拌桩费用高。可根据工程实际情况选择桩型,以达到技术可靠、经济合理的目的。

参 考 文 献

- [1] 史佩栋. 实用桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [3] Geddes J D. Stress in foundation soils due to vertical subsurface load[J]. *Geotechnique*, 1996, (3): 231—255.
- [4] 郝玉龙. 深厚结构性软土部分处理地基固结沉降性状及工程应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- [5] JGJ94—94, 建筑桩基技术规范[S].

上接第 894 页

computing the prestressing force of the anti-slide pile with prestressed cable[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2002, 10(3): 317—320.

- [6] 邹兴普. 锚索抗滑桩的设计计算[J]. 路基工程, 2000, (2): 9—10.
- [7] 周春梅, 殷坤龙, 罗冲. 锚拉桩应用于水库库岸滑坡治理的关键问题探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 450—455.

ZHOU Chun-mei, YIN Kun-long, LUO Chong. A study on some key questions of cable-anchored piles of landslide in reservoir shore lines[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(3): 450—455.

- [8] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
 - [9] 龙驭球, 包世华, 支秉琛. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
 - [10] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
 - [11] 周德培, 王建松. 预应力锚索桩内力的一种计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 247—250.
- ZHOU De-pei, WANG Jian-song. Design method of retaining pile with prestressed cable[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(2): 247—250.