

# 路堤重复加卸载下坡脚倾斜摩擦桩变位规律试验研究

周德泉<sup>1</sup>, 黎冬志<sup>1,2</sup>, 冯晨曦<sup>1</sup>, 陈圣保<sup>1</sup>, 周毅<sup>3</sup>

(1.长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.贵州宏信创达工程检测咨询有限公司;  
3.广东省长大公路工程有限公司)

**摘要:**通过模型试验研究路堤重复加卸载下坡脚处顶部约束双排倾斜摩擦桩变位规律,为坡脚处抗滑桩优化设计提供依据。结果表明:①加载过程中,顶部约束后排摩擦倾斜桩桩身侧移随深度变化曲线与纵轴之间呈“上宽下窄”的倒梯形,破坏模式为“平移+绕桩底转动”。对于 $0\sim 9^\circ$ 负斜桩,加载过程中桩身侧移随倾斜角增大而减小。首次加载过程中,桩身侧移随加载增加而增加。再次加载过程中,首次极限压力范围内桩身侧移不敏感,超过首次极限压力时,侧移随加载增加而增加;加载到一定压力下,侧移增速减小;②相同荷载作用下,负斜桩顶侧移小于竖直桩,与负斜桩主动承受桩顶水平荷载作用下桩顶水平位移大于直桩相反。首次加载时,各倾斜桩顶侧移均随荷载增大而增大,加载到一定值时,竖直桩顶侧移突增、率先屈服,随后趋于稳定。再次加载时,桩顶侧移随荷载增大而缓慢增加,荷载超过前一次加载的最大荷载时,倾斜桩顶侧移突增,地基侧向加载与桩顶侧移曲线将回到前次加载曲线的延长线,即具有记忆效应,随后屈服、趋于稳定;③卸载过程中,桩身各截面侧移不敏感,仅仅卸载到最后1~2级荷载时才有明显减小。工程中,建议将坡脚抗滑桩尽量斜向道路中线设置一定倾斜角度,以减少桩顶桩身侧移,提高抗滑移效果。

**关键词:**抗滑桩;模型试验;双排负斜桩;重复加卸载;位移

## 1 前言

倾斜桩常用于桥梁、码头、输电线路等高耸结构物基础,以抵抗较大的水平荷载,其作为主动桩的工作机制受到关注。Meyerhof等采用模型试验研究了斜桩在倾斜荷载下的受力-变形特性,给出了桩身倾斜度、荷载倾斜角对斜桩桩顶水平位移的影响曲线;Zhang等通过离心机试验研究了斜桩的水平承载特性,并对直桩 $p-y$ 曲线进行修正,得到了斜桩的 $p-y$ 曲线;郑刚等对倾斜桩受水平荷载和竖向荷载开展研究,认为同等条件下,受水平荷载时倾斜单排桩的抗倾覆能力优于竖直单排桩;随着排桩倾斜度增加,桩身最大水平位移和桩身最大弯矩均逐渐减小;吕凡任等开展对称双斜桩基础研究,认为受相同水平荷载作用下,双斜桩基础的水平位移随着斜桩倾角的增加,其水平位移逐渐减小。受竖向荷载作用下桩的倾角在 $5^\circ\sim 10^\circ$ 内

变化时,其竖向承载力较大,与其他倾角对称双斜桩基础相比较,该倾角范围最优;凌道盛研究了砂土地基斜桩水平承载特性,认为 $p-y$ 曲线法能够很好地揭示斜桩水平承载特性;徐江对大口径钢管斜桩进行数值模拟与现场试验研究,认为直桩的极限承载力小于设计值,斜桩的极限承载力大于设计值,斜桩端阻力占比高于直桩,桩侧阻力占比低于直桩;王新泉开展倾斜桩模型试验,认为倾斜桩水平位移主要发生在桩体上部,约 $1/3$ 桩长范围内;倾斜桩水平位移量随着上部荷载和倾斜角度的增加而增大;曹卫平采用有限元软件模拟了斜桩在水平荷载作用下的性状,认为正斜桩(桩顶水平荷载方向与桩身倾斜方向相同)的水平承载力比直桩大,负斜桩(桩顶水平荷载方向与桩身倾斜方向相反)的水平承载力比直桩小,正斜桩桩顶水平位移小于直桩,负斜桩桩顶水平位移大于直桩;李吉人通过数值模拟,认为在斜桩结构的内力中,斜桩的轴力起主要支配作用,可有效分担地震的作用力,在输入地震动不同

收稿日期:2018-12-20(修改稿)

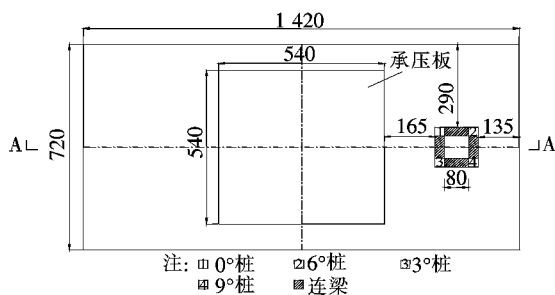
基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51378083,50978036);湖南省交通运输厅科技项目(编号:201304);国家级大学生创新实验项目(编号:201610536004);长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(编号:2016-1)

作者简介:周德泉,男,博士(后),教授,博士生导师.E-mail:zhoudequan28@163.com

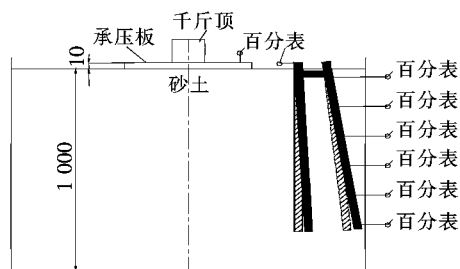
时,直桩结构与斜桩结构的抗震性能不同。以上研究集中在倾斜桩主动承载时的工作机制,作为被动桩的倾斜桩工作机制少见报道。该文提出在路堤坡脚采用负斜桩抵抗软土侧向移动,采用室内模型试验,研究路堤重复加卸载下坡脚处顶部约束双排倾斜摩擦桩变位规律,为高路堤下软土工程的处治设计提供指导与参考。

## 2 模型试验概况

此次试验在  $1\,420\text{ mm} \times 720\text{ mm} \times 1\,100\text{ mm}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)的模型槽中进行,模型槽用钢条焊接成框架,加钢化玻璃和木板组装而成。槽内模型桩布置如图 1 所示,图中 4 根桩和 4 根连梁都采用木板制成方形模具,再填充水泥砂浆。4 根桩的倾斜角(桩轴线与垂线之间的夹角)分别为  $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 、 $6^\circ$ 、 $9^\circ$ 。模型桩和连梁的具体参数见表 1。



(a) 平面布置图



(b) A-A 剖面图

图 1 模型桩布置示意图(单位:mm)

表 1 模型桩参数

桩号	边长 $D/\text{mm}$	长度 $L/\text{mm}$	截面 形状	弹性模量 $E/\text{GPa}$	材料
$0^\circ$ 桩、 $3^\circ$ 桩、 $6^\circ$ 桩、 $9^\circ$ 桩	30	800	方形	12.06	水泥砂浆
连梁	30	80	方形	12.06	水泥砂浆

模型土采用干砂,最大粒径 3 mm,不均匀系数  $C_u = 5.5$ ,曲率系数  $C_c = 2.7$ ,级配良好,土体在自重作用下没有明显分层,填土厚度 1 m。填土前,先把各桩

在模型槽内的分布位置按图 1(a)确定好,然后用方木和透明胶在全部模型桩中部、顶部分别固定,确保填土时桩的倾斜角准确、稳定。当填土厚度 500 mm 左右时,拆除支护方木,用 AB 胶固定连梁。 $6^\circ$ 桩和  $9^\circ$ 桩外侧在不同深度(距离桩顶分别为 50、190、330、470、610、750 mm)水平设置直径为  $\phi 10\text{ mm}$  的 12 根 PVC 管,用透明胶将 PVC 管端与桩表面无缝紧贴,确保模型土不进入 PVC 管内形成堵塞、影响侧移的测试精度。填筑采用“砂雨法”,每层 10 cm。完成后静置近 1 个月,让模型土自重沉降。

百分表用加长探针接长。试验前,将加长探针穿过水平 PVC 管,稳固安装  $6^\circ$ 、 $9^\circ$ 桩垂直方向上不同位置的 12 个百分表, $0^\circ$ 、 $3^\circ$ 桩的顶部分别安装 1 个百分表。整个试验由标定后的千斤顶加载,通过固定式反力梁提供反力。此次试验共进行 3 次重复加、卸载。试验参照 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》进行,在  $540\text{ mm} \times 540\text{ mm} \times 10\text{ mm}$  (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚)的承压钢板上共进行了 3 次加载和卸载循环,模拟路堤 3 次重复加卸载,获得了承压钢板侧面(相当于路堤坡脚处)顶部约束的双排倾斜摩擦桩的变位规律。

## 3 模型试验结果与分析

### 3.1 路堤 3 次重复加卸载过程与沉降曲线特征

图 2 为路基压力  $P$ —沉降  $s$  曲线,第 1、2、3 次加载最大压力分别为 44.524、117.3、54.448 kN。

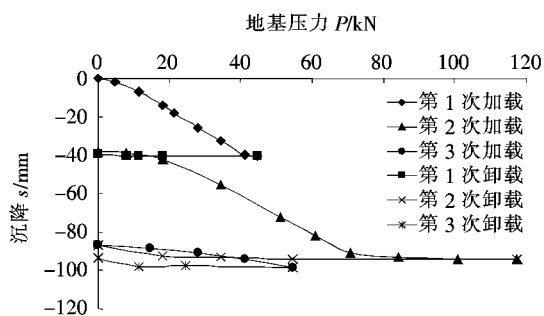


图 2 路基压力  $P$ —沉降  $s$  曲线

由图 2 可知:第 1 次和第 3 次加载曲线形态相似,均呈“上凸形”,符合填土地基的变形特征;第 2 次加载前期曲线形态也呈“上凸形”,压力超过一定值后,沉降曲线回到首次加载曲线的延长线,具有记忆效应。随后沉降增长缓慢,原因是模型土在高压下非常密实,第 3 次加载曲线比前 2 次加载曲线平缓也是这个原因。3 次卸载曲线规律相似,即卸载前期均体现不可恢复的塑性变形,仅仅卸载到零才有明显的弹性变形。

3.2 加载过程中后排桩桩身侧移随深度变化规律

图3~5为3次加载过程中,后排倾斜桩在各级荷

载(指路基承受的垂直荷载,下同)下桩身侧移  $x$  与离桩顶距离  $z$  的变化曲线。

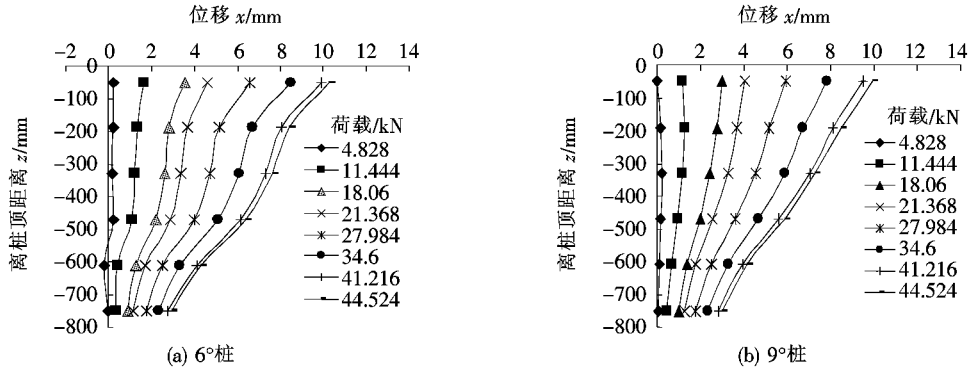


图3 第1次加载过程中后排桩桩身侧移随深度变化规律

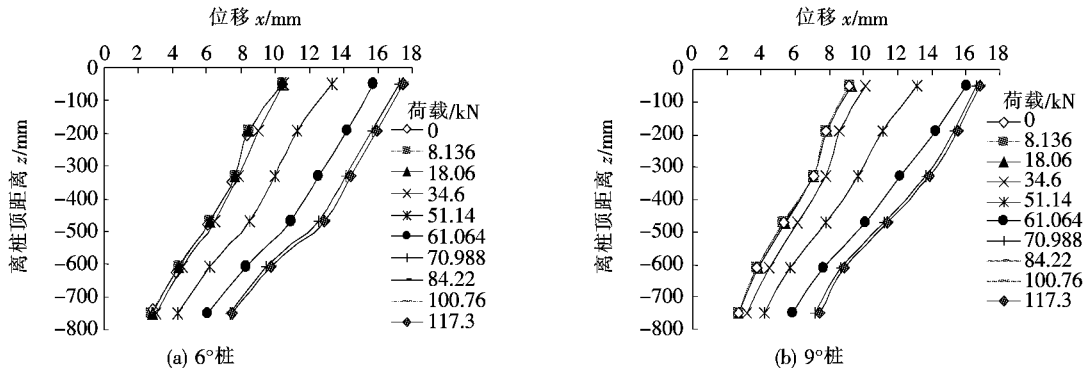


图4 第2次加载过程中后排桩桩身侧移随深度变化规律

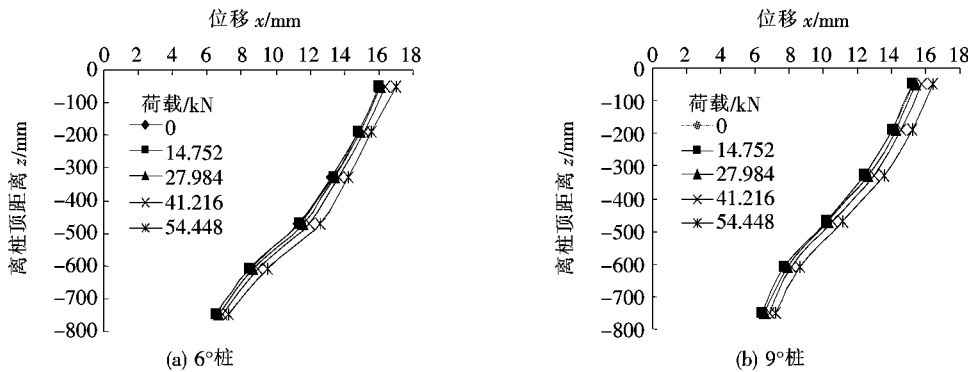


图5 第3次加载过程中后排桩桩身侧移随深度变化规律

由图3~5可知:

(1) 3次加载过程中,桩身侧移随深度变化曲线与纵轴之间均呈“上宽下窄”的倒梯形,即随着荷载的增加,6°桩和9°桩的桩身各截面侧移逐渐增加,且桩身上部侧移增速大于下部侧移增速,桩底侧移最小,但不为零,与复合地基上加载时侧向约束桩的桩身侧移沿深度先增大、后减小、存在峰值明显不同,说明加载过程中,顶部约束的后排摩擦倾斜桩破坏模式为“平移+

绕桩底转动”。

(2) 3次加载过程和各级荷载作用下,某标高处6°桩侧移大于9°桩侧移,即对于负斜桩,加载过程中桩身侧移随倾斜角增大而减小。

(3) 不同压力阶段,侧移发展过程有差异。首次加载过程中,桩身侧移随加载增加而增加,加载到一定压力,侧移增速减小。再次加载过程中,首次极限压力范围内桩身侧移不敏感,超过首次极限压力时,侧移随

加载增加而增加;加载到一定压力下,侧移增速减小。分析认为,土体在每一级加载过程中逐渐产生塑性变形,土体压实度逐渐增高,模型槽的约束使桩背产生被动土压力,桩侧移趋于稳定。第 3 次加载过程中,首次极限压力范围内桩身侧移不敏感,超过首次极限压力

时,侧移才明显增加。

### 3.3 卸载过程中后排桩桩身侧移随深度变化规律

图 6~8 为卸载过程中,后排桩在各级荷载下桩身侧移  $x$  与离桩顶距离  $z$  的变化曲线。

由图 6~8 可知:

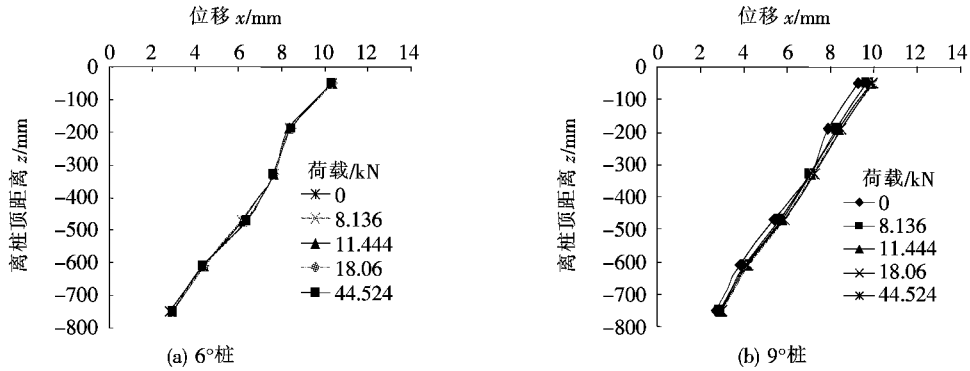


图 6 第 1 次卸载过程中后排桩身侧移随深度变化规律

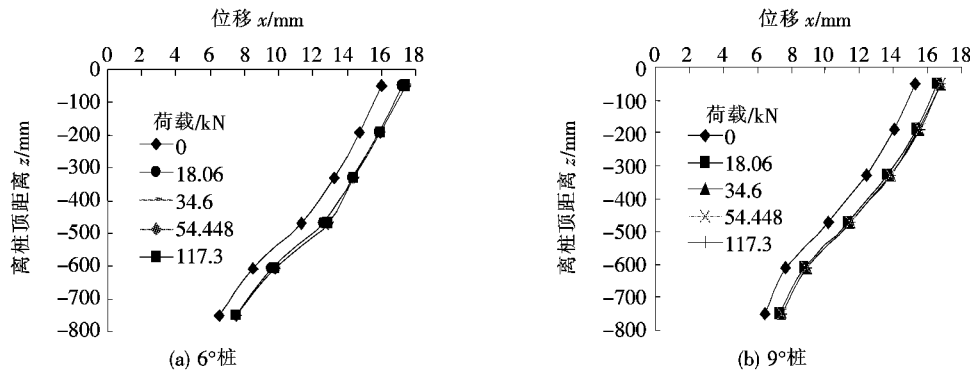


图 7 第 2 次卸载过程中后排桩身侧移随深度变化规律

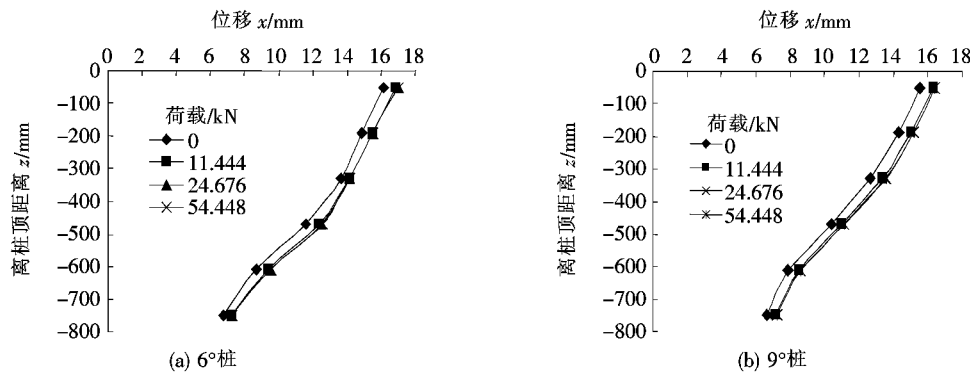


图 8 第 3 次卸载过程中后排桩身侧移随深度变化规律

(1) 3 次卸载过程中,桩身侧移随深度变化曲线维持相应最大加载时的曲线线形,与纵轴之间均呈“上宽下窄”的倒梯形。

(2) 3 次卸载过程中,后排桩桩身各截面侧移不敏感,仅仅卸载到零才有明显缩小,与竖向卸载规律一致。原因是,桩身各截面侧移主要为塑性变形。

(3) 不同卸载阶段,侧移发展过程相同。

### 3.4 不同加卸载阶段相同压力下后排桩桩身侧移变化规律

图 9 为 3 次循环加卸载阶段桩身侧移变化规律对比。此处“加载”指每次循环最大荷载,“卸载”指每次卸载为零。

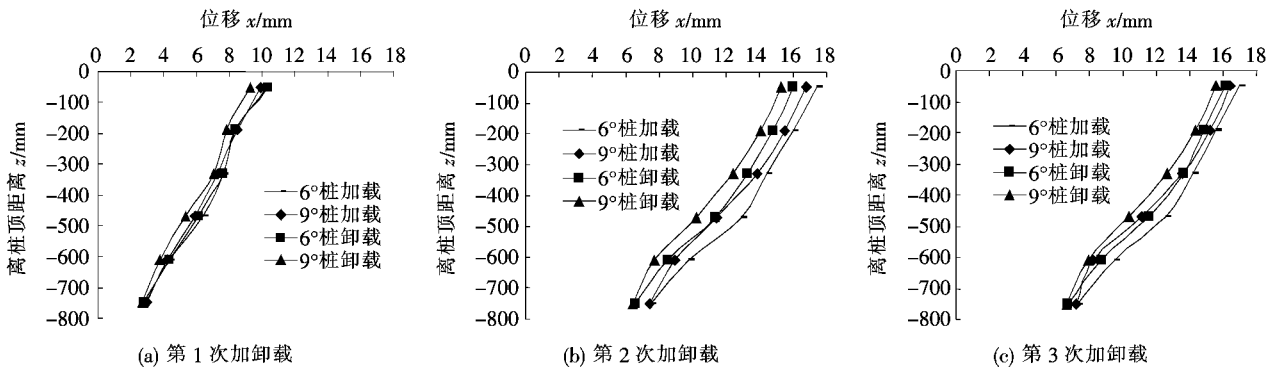


图9 不同加卸载阶段桩身侧移变化规律

由图9可知:

(1) 3次循环加载阶段,6°桩加载曲线均在9°桩加载曲线的右侧;3次循环卸载阶段,6°桩卸载曲线均在9°桩卸载曲线的右侧。说明某荷载作用下,6°桩侧移大于9°桩侧移,即对于负斜桩,加(卸)载过程中桩身侧移随倾斜角增大而减小。这与郑刚研究的倾斜单排桩在水平荷载作用下,随着排桩倾斜度增加,桩身最大水平位移逐渐减小结论相似。

(2) 3次循环加(卸)载阶段,各桩“加载”到循环最大荷载、“卸载”到零,桩身侧移曲线形态相同;“卸载”曲线总在“加载”曲线左侧,说明“卸载”到零时出现弹性变形。

3.5 各倾斜桩顶侧移随3次重复加载变化规律

图10为重复加载过程中不同倾斜角度桩顶侧移y与地基侧向加载P的变化曲线。

由图10可知:

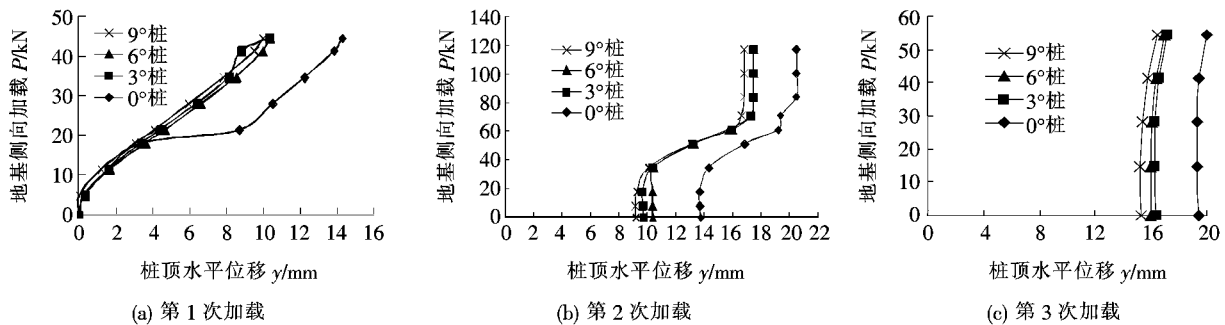


图10 不同倾斜角度桩顶侧移随加载变化规律

(1) 首次加载时,各倾斜桩顶侧移均随荷载增大而增大,加载到一定值时,竖直桩顶侧移突增、率先屈服,随后趋于稳定,说明竖直桩的水平承载力比负斜桩小。各桩再次加载时,各倾斜桩顶侧移均随荷载增大而缓慢增大,荷载超过前一次加载的最大荷载时,倾斜桩顶侧移突增、屈服,随后趋于稳定,这与桩后土体趋于被动状态密切相关。

(2) 3次加载过程中,桩顶侧移均随荷载增大而增大。相同荷载作用下,负斜桩顶侧移小于竖直桩,与负斜桩在桩顶水平荷载作用下桩顶水平位移大于直桩相反。桩顶侧移均随倾斜角增大而减小,说明适当增大倾斜角度可减少桩顶侧移。工程中,施工可行时,可以将坡脚桩设置一定倾斜角度来减少桩顶侧移、提高加固效果。

3.6 各倾斜桩顶侧移随3次重复卸载变化规律

图11为重复卸载过程中不同倾斜角度桩顶侧移y与地基侧向卸载P变化曲线。

由图11可知:

(1) 3次卸载过程中,荷载大于20 kN时曲线是竖直的,低于20 kN才出现明显转折,说明在卸载的初、中期,桩顶水平位移没有变化,为不可恢复的塑性变形,到最后1~2级荷载时开始出现弹性变形。荷载卸为零时,弹性变形最大,此规律与地基土的垂直位移回弹曲线相似。

(2) 3次卸载过程中,0°桩侧移曲线位于3°桩右侧,6°桩侧移曲线位于9°桩右侧,说明对于同一排桩,相同荷载作用下,桩顶侧移均随倾斜角增大而减小。

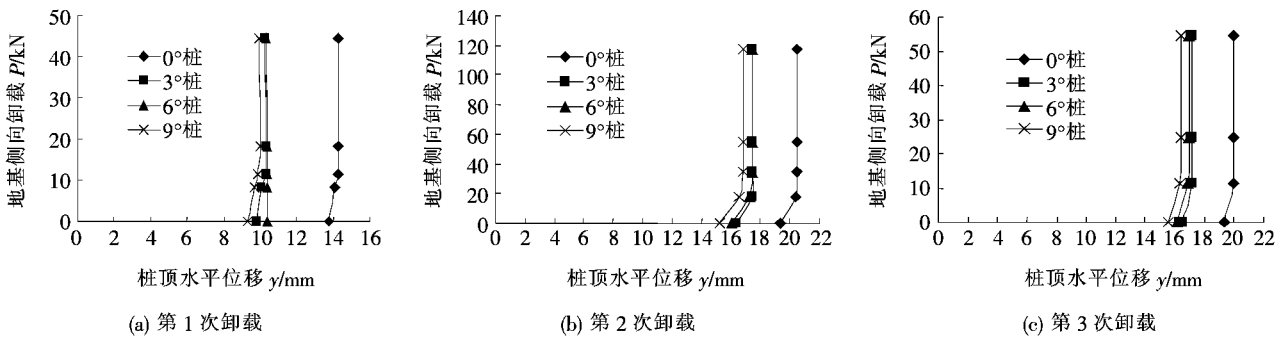


图 11 不同倾斜角度桩顶侧移随卸载变化规律

### 3.7 不同加载阶段倾斜桩顶侧移变化规律

图 12 为不同加载阶段桩顶侧移  $y$  与地基侧向加

载  $P$  变化曲线。

由图 12 可知：

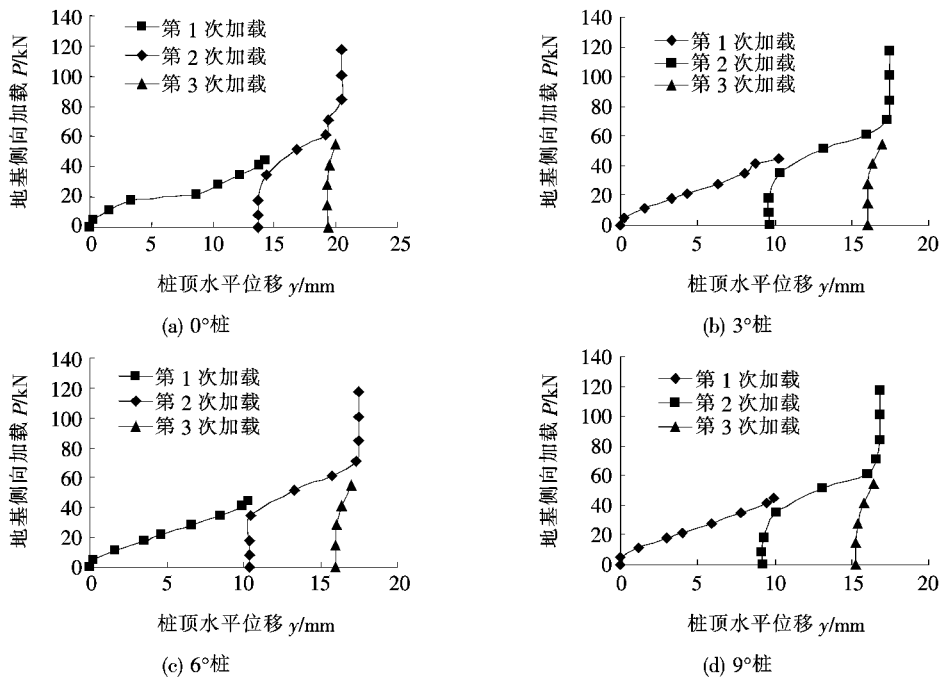


图 12 不同加载阶段桩顶侧移变化规律

(1) 首次加载和重复加载过程中，桩顶侧向位移随荷载的增加而增加，增加速率随重复加载次数增加而减少。分析认为经过前一次加载，桩土发生了不可恢复的塑性变形。第 2 次加载到一定值后，桩顶侧移不再增加，分析原因为图 2 所示路基沉降  $s$  在压力  $P$  增大到一定值后增长缓慢造成的。

(2) 重复加载过程中，若荷载超过前次加载的最大荷载，地基侧向加载  $P$  与桩顶侧移曲线将回到前次加载曲线的延长线，即具有记忆效应。这与土体的再压缩曲线特征类似。

### 3.8 不同卸载阶段倾斜桩顶侧移变化规律

图 13 为不同卸载阶段桩顶侧移  $y$  与地基侧向加载  $P$  变化曲线。

由图 13 可知：

(1) 每次卸载阶段的曲线都是从竖直线向原点发展，卸载初期，荷载的减小不影响桩顶侧移，当卸载到最后 1~2 级时桩顶侧移开始减小，尤其是当荷载减为 0 时侧移回弹最大。每个阶段的曲线线形相似且互相平行。

(2) 第 2 次卸载曲线在第 1 次卸载曲线右侧，而第 3 次卸载一开始在第 2 次卸载曲线左侧，到最后 1 级两曲线基本重合。分析认为第 1 次卸载最大荷载小于第 2 次卸载最大荷载，再次加高荷载阶段的变形有塑性和弹性两种变形。而当再次加低荷载，即第 3 次卸载最大荷载小于第 2 次卸载最大荷载时，只发生弹性变形，完全卸载后恢复到第 2 次卸载时的位移。

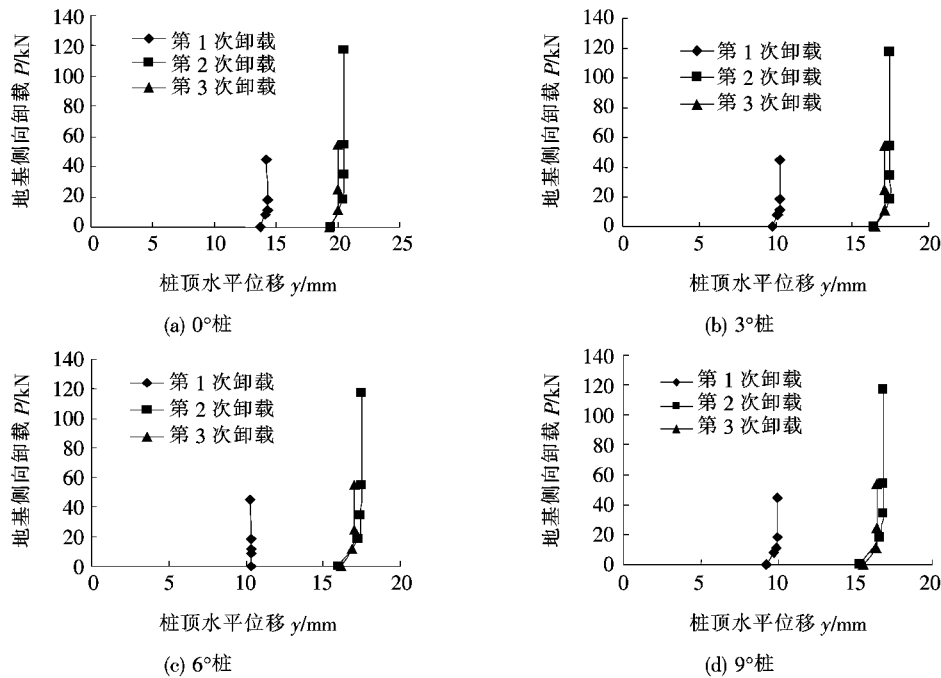


图 13 不同卸载阶段桩顶侧移变化规律

## 4 结论

通过对路基重复加卸载下,顶部约束双排倾斜摩擦桩被动受力变位规律的研究,得到以下结论:

(1) 加载过程中,顶部约束后排摩擦倾斜桩桩身侧移随深度变化曲线与纵轴之间呈“上宽下窄”的倒梯形,与复合地基上加载时侧向约束桩的桩身侧移沿深度先增大后减小、存在峰值明显不同。破坏模式为“平移+绕桩底转动”。对于负斜桩,加载过程中桩身侧移随倾斜角增大而减小。不同加压阶段,侧移发展过程有差异。首次加载过程中,桩身侧移随加载增加而增加。再次加载过程中,首次极限压力范围内桩身侧移不敏感,超过首次极限压力时,侧移随加载增加而增加。

(2) 相同荷载作用下,负斜桩顶侧移小于竖直桩,与负斜桩主动承受桩顶水平荷载作用下桩顶水平位移大于直桩相反。首次加载时,各倾斜桩顶侧移均随荷载增大而增大,加载到一定值时,竖直桩顶侧移突增、率先屈服,随后趋于稳定。再次加载时,荷载超过前一次加载的最大荷载时,倾斜桩顶侧移突增,路基侧向加载与桩顶侧移曲线将回到前次加载曲线的延长线,即具有记忆效应,随后屈服、趋于稳定;荷载没有超过前一次加载的最大荷载时,桩顶侧移随荷载增大而缓慢增加。

(3) 卸载过程中,桩身各截面侧移不敏感,仅仅卸载到最后1~2级荷载时才有明显缩小。

(4) 工程中,建议将坡脚桩尽量设置一定倾斜角度(斜向道路中线),以减少桩顶桩身侧移、提高加固效果。

## 参考文献:

- [1] MEYERHOF G C, YALCIN A S. Behaviour of Flexible Batter Piles under Inclined Loads in Layered Soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 30(2): 247-256.
- [2] ZHANG L M, MCVAY M C, LAI P W. Centrifuge Modeling of Laterally Loaded Single Battered Piles in Sands [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, 36(6): 1 074-1 084.
- [3] 王丽, 郑刚. 局部倾斜桩竖向承载力的有限元研究[J]. 岩土力学, 2009(11).
- [4] 郑刚, 王丽. 竖向荷载作用下倾斜桩的荷载传递性状及承载力研究[J]. 岩土工程学报, 2008(3).
- [5] 郑刚, 白若虚. 倾斜单排桩在水平荷载作用下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊1).
- [6] 郑刚, 李帅, 杜一鸣, 等. 竖向荷载作用下倾斜桩的承载力特性[J]. 天津大学学报, 2012(7).
- [7] 徐源, 郑刚, 路平. 前排桩倾斜的双排桩在水平荷载下的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊1).
- [8] 吕凡任, 邵红才, 金耀华. 对称双斜桩基础水平承载力模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013(2).
- [9] 吕凡任, 陈云敏, 陈仁朋, 等. 任意倾角斜桩承受任意平面荷载的弹性分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004(2).

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.01.002

# 海绵城市渗水雨水井新构造及入渗流量计算方法

郭振清<sup>1</sup>, 张春会<sup>2,3\*</sup>, 关彤军<sup>3</sup>, 阎发泉<sup>4</sup>, 王芳<sup>1</sup>

(1.石家庄市市政建设总公司,河北 石家庄 050000; 2.河北科技大学 建筑工程学院;  
3.石家庄市政设计研究院有限责任公司; 4.石家庄市排水管理处)

**摘要:**为实现海绵城市建设目标,提出了一种由溢流容积、渗水容积、开孔透水混凝土底板和碎石透水井组成的渗水雨水井新构造,可用于老、旧小区道路改造。分析了雨水收集入渗雨水井的3种工况,在井内常水位条件下,建立了雨水从碎石透水井入渗砂层的瞬态渗流控制方程,结合初边值条件和积分变换方法给出了孔隙水压力和渗流流量的解析解。利用解析解分析了渗水雨水井内积水入渗地层的过过程,结果表明:①文中解析解能计算雨水入渗地层过程中的孔压动态演化和入渗流量的动态演变过程;②稳定入渗水流量与渗透系数呈线性正比关系,入渗稳定所需时间与渗透系数呈线性反比关系;③文中解析解和简化公式可用于海绵城市渗水雨水井入渗流量计算。

**关键词:**海绵城市;雨水井;新构造;入渗流量

## 1 引言

为改善城市生态环境,减轻城市热岛效应和内涝灾害,2014年住房和城乡建设部发布了《海绵城市建设技术指南》,鼓励中国各个城市建设海绵城市。2015年,迁安、镇江、南宁等16个城市入选海绵城市建设试点城市。随后,海绵城市建设技术已被国内外学者广泛关注。在海绵城市建设技术方面,美国率先提出了

低影响开发的概念(Low Influence Development),随后一些国外学者先后研究了低影响开发建设技术。中国学者也先后对透水路面、植草沟、雨水花园、生物滞留带、下凹式绿地等海绵城市结构设施开展了研究。然而在城市中存在大量已建成小区,这些小区很难建设上述雨水入渗结构。如何通过简单改造在已建成小区实现海绵城市建设目标,对于海绵城市建设具有重要意义。为此,该文基于海绵城市理念,提出一种集雨水入渗、滞留为一体的新型雨水井构造,该雨水井可用

\*\*\*\*\*

[10] 吕凡任,邵红才,金耀华.对称双斜桩桩基础竖向承载力模型试验研究[J].工业建筑,2012(5).

[11] 凌道盛,任涛,王云岗.砂土地基斜桩水平承载特性  $p-y$  曲线法[J].岩土工程学报,2013(1).

[12] 徐江,龚维明,张琦,等.大口径钢管斜桩竖向承载特性数值模拟与现场试验研究[J].岩土力学,2017(8).

[13] 王新泉,陈永辉,安永福,等.塑料套管现浇混凝土桩倾斜对承载性能影响的模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2011(4).

[14] 曹卫平,樊文甫.水平荷载作用下斜桩承载变形性状数值分析[J].中国公路学报,2017(9).

[15] 曹卫平,夏冰,赵敏,等.砂土中水平受荷斜桩的  $p-y$  曲

线及其应用[J].岩石力学与工程学报,2018(3).

[16] 李吉人,宋波,吴澎.全直桩与斜桩高桩码头结构地震动力损伤对比研究[J].建筑结构学报,2016(7).

[17] 周德泉,周果子.一种加固倾斜软基的组合型复合地基:中国,ZL201621328014.7[P],2017-04-27.

[18] 周德泉,罗坤,冯晨曦,等.一种室内土工模型实验装置:中国,ZL201520323607.3[P],2015-08-26.

[19] 周德泉,谭焕杰,徐一鸣,等.循环荷载作用下花岗岩残积土累积变形与湿化特性试验研究[J].中南大学学报:自然科学版,2013(4).

[20] 周德泉,颜超,罗卫华.复合桩基重复加卸载过程中侧向约束桩变位规律试验研究[J].岩土力学,2015(10).

收稿日期:2018-05-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51574139);河北省重点科技研发项目(编号:18276109D,15275409D)

作者简介:郭振清,男,大学本科,高级工程师.E-mail:623160637@qq.com

\*通信作者:张春会,男,教授.E-mail:zhangchunhui789@126.com