DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.003

含缺陷桩复合地基重复加卸载下临近桩顶部侧移规律试验

焦隆华[1]，周德泉[2]，胡伟飘[2,3]，李健[2]

(1.湖南省永龙高速公路建设开发有限公司，湖南 永顺 416700；2.长沙理工大学 土木工程学院；3.湖南省建筑设计院有限公司)

摘要：桩体复合地基在软基处理中大量采用，桩体缺陷难以避免，临近设置桩可控制该复合地基水平位移。设计模型试验，研究含缺陷桩复合地基重复加卸载曲线特征与临近嵌岩桩、摩擦桩及其桩顶自由或者通过连梁连接时顶部侧移规律，以指导临近桩的设计。结果表明：① 含缺陷桩复合地基的加卸载曲线特征与一般地基相似，加载曲线呈上凸形，卸载曲线呈下凹形；② 随着压力增加，临近桩顶部侧移逐渐增大，增长率随重复加载次数增加而减小。首次加载时，侧移增长经历快速增长、缓慢增长、快速增长3个阶段，第2、3、4次加载时，侧移经历平缓增长、快速增长两个阶段。卸载曲线在最后1～2级荷载处具有拐点，拐点前产生塑性变形，拐点后开始出现弹性变形。桩顶约束条件对回弹变形影响小；③ 相比摩擦桩，嵌岩桩对重复加卸载不敏感，桩顶位移小，说明临近嵌岩桩比摩擦桩的约束效果好。相比桩顶自由单桩，桩顶连梁连接的桩受压产生较大侧移，但对重复加载不敏感，说明桩顶连接连梁的桩整体约束效果好。实际工程中，复合地基内缺陷桩很多时，建议在侧面设置顶部通过连梁连接的嵌岩桩控制含缺陷桩复合地基的水平移动。

关键词：含缺陷桩复合地基；重复加卸载；临近桩；模型试验；侧移

1 前言

桩体复合地基在软基处理工程中大量采用，取得了良好的工程效果。但是，桩体断裂、缩径、扩径、倾斜等缺陷难以避免，常引起工程病害。与基础工程中大直径桩不同的是，地基处理工程中桩的直径小、数量多，较小的缺陷率也导致缺陷桩数量往往很大，其质量评定及逐桩处治有较大困难。粉喷桩在软土地基加固中具有侧向约束效果，笔者提出在坡脚主动设置桩体(该文称为临近桩)形成组合型复合地基控制倾斜软基或者含缺陷桩复合地基的侧向移动，但其工作机制复杂，设计具有盲目性。此时的临近桩属于被动桩。被动桩问题比较复杂，目前已取得了部分研究成果。Poulos利用弹性半无限体的Mindlin方程计算桩土之间的相互作用，得到桩体内力和挠曲变形；Matsui等为验证Ito等提出的抗滑桩侧向土压力计算公式，开展模型试验，认为侧向土压力随土体位移增大而增加，达到峰值后，黏土的侧向压力基本不随位移再增大，而砂土有所减少；Bransby通过三维有限元法验证了桩土间相互作用；李国豪建立桩－土之间的弹性平衡微分方程，剖析桩身受力变形与侧向位移；杨敏等结合堆载引起某厂房坍塌事故，采用有限元分析了堆载下土体侧移及对邻桩作用；周健等对被动侧向受荷桩进行了模型试验及颗粒流数值模拟；王恺敏等运用三维数值方法，分析大面积堆载条件下桩身负摩阻力及变形；李忠诚等通过三维数值方法，模拟地面堆载作用下土体受力变形规律，提出了堆载条件下邻近桩受力变形的实用计算方法；梁发云等采用非线性 $p-y$ 曲线法及Winkler模型，研究土体侧移时临近桩的变形，获得了土体变形与桩体承受的垂直荷载之间的相互作用规律；吴琼开展模型试验，研究侧向堆载作用下砂土中单

收稿日期：2019－04－12(修改稿)

基金项目：国家自然科学基金资助项目(编号：51378083)；湖南省交通运输厅资助项目(编号：201304)

作者简介：焦隆华，男，大学本科，工程师.

桩的受力变形规律。以上研究主要集中在均质地基上堆载对侧向桩体的影响。桩体复合地基上堆载时，笔者采用模型试验，研究了桩体复合地基重复加、卸载过程中不同间距临近桩变位规律及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，但是，含缺陷桩复合地基重复加卸载过程中临近桩顶部侧移规律未见报道。该文采用模型试验，研究含缺陷桩复合地基4次重复加(卸)载过程中，临近桩(桩底自由和桩底嵌固，桩顶自由和连梁连接)顶部位移变化规律与差异，以指导处治含缺陷桩复合地基的临近桩工程设计。

2　模型试验概况

2.1　模型土和模型槽参数

模型试验是在室内尺寸为 2.5 m×1.5 m×1.5 m(长×宽×高)的钢筋混凝土模型槽内进行，使用的模型土由过筛后室内存放 6 年的干燥花岗岩残积土与建设用砂等比拌和、“砂雨法”自重填筑而成，以模拟全风化花岗岩及其残积土快速填方工程，填土厚度为 1.1 m。经测试，填筑后土体密度 1.80 g/cm^3，相对密度 2.62，含水量 2%，曲率系数 C_c=1.39，不均匀系数 C_u=5.36，最大粒径 5 mm，级配良好。

临近桩的 4 根模型桩(编号为 A、B、C、D)采用边长为 50 mm 的方形截面水泥砂浆桩，参数见表 1，其中，A、C 两根桩的底端嵌固、长度 120 cm，B、D 两根桩的底端自由、长度为 110 cm。复合地基的 9 根模型桩(编号为 Z1～Z9)采用边长 8 cm、桩长 80 cm 的方形桩，弹性模量为 9.52 GPa，桩底自由，其中，Z1、Z2 和 Z3 分别为 1/4、2/4 和 3/4 缩径桩，Z4、Z5 和 Z6 分别为2/4断桩、正常桩和1/4断桩，Z7、Z8 和 Z9 分别是 1/4、2/4和 3/4 扩径桩。

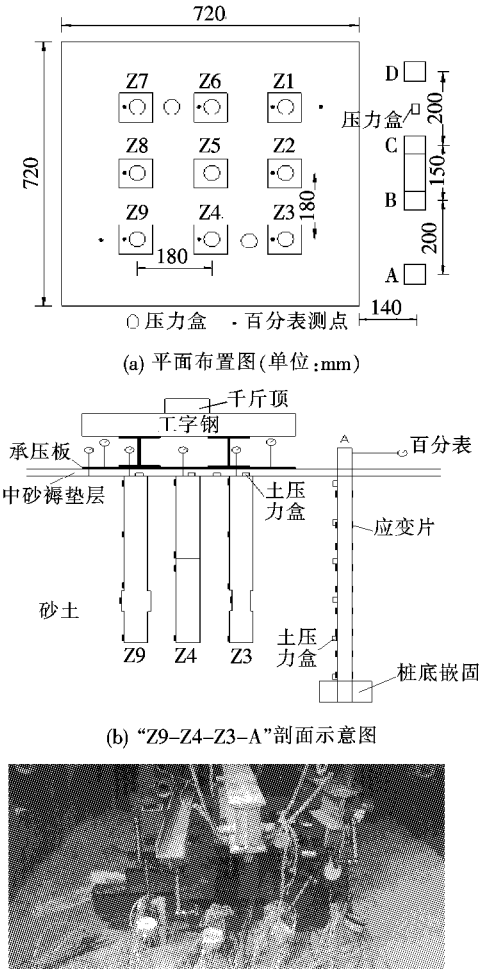
表 1　模型桩参数

桩号	边长 D/mm	长度 L/mm	弹性模量 E/GPa	桩底状态	桩顶状态
A	50	1 200	18.55	嵌固	自由
B	50	1 100	18.55	自由	连梁
C	50	1 200	18.55	嵌固	连梁
D	50	1 100	18.55	自由	自由

注：① A 与 B、C 与 D 之间的中心距为 20 cm，B 与 C 之间的中心距为 15 cm；② A 与 D 对称、顶部自由，B 与 C 对称、顶部用连梁连接；③ 模型桩弹性模量采用简支梁法测定。

2.2　模型设置及试验过程

试验前，在模型桩侧面粘帖应变片，在临近桩侧面固定压力盒。填土前，先按图 1(a)确定各桩在模型槽内的分布位置。A、C 两根桩嵌固底端的方法是：将设桩位置的混凝土地板用清水洗涤干净、晾干，然后将地板和桩底分别涂抹足量 AB 胶并黏合至足够牢固，最后用相同办法在桩底周围用混凝土小试块围箍、胶水黏合。A 与 B、C 与 D 之间的中心距为 20 cm(4 倍桩径)，B 与 C 之间的中心距为 15 cm(3 倍桩径)，并且 B 桩(底端自由)与 C 桩(底端嵌固)桩顶用连梁连接。采取分层均匀填土，确保在填土时桩体垂直、平面位置准确。填土完成后，在 Z1～Z9 桩顶部和土顶部设置土压力盒和沉降标，在每根临近桩桩顶处架设百分表。静置 30 d，让模型土自重沉降。



(a) 平面布置图(单位：mm)

(b) “Z9-Z4-Z3-A”剖面示意图

(c) 试验现场照片

图 1　模型桩布置图

模型槽上端设有平台，码堆足量砝码以提供反力，采用油压千斤顶在 720 mm×720 mm 的加肋钢板上

共进行了 4 次加载和卸载循环，加肋钢板的 3 个方向与槽内壁均相距 390 mm，第 4 个方向相距 140 mm 设置临近桩。试验现场见图 1(c)。试验按规范进行。要点为：预加载 5～6 kN 再卸载，以校核加载装置的整体性能；第 1 级加载 4 MPa(油压表)，根据油压表整数分级加载，荷载增量为 2 MPa(油压表)，每级加载前后测读承压板沉降量和临近桩的侧移，以后每 0.5 h 测读 1 次，当 1 h 内承压板沉降小于 0.1 mm 时加下一级荷载；根据变形特征与平台反力决定终载；小心操作油泵旋纽、尽量分级卸载，每级维持 0.5 h，测读承压板沉降量和临近桩的水平位移。每次加载卸载完成后，间隔 12 h 进行下次加载卸载循环。获得了含缺陷桩复合地基 4 次重复加(卸)载过程中，临近桩(桩底自由和桩底嵌固，桩顶自由和连梁连接)顶部位移变化规律与差异(获得的其他规律另文讨论)，为采用临近桩处治含缺陷桩复合地基提供试验依据。为表达简便，该文将桩底自由的模型桩称为摩擦桩，将桩底嵌固的模型桩称为嵌岩桩。

3 试验结果与分析

3.1 含缺陷桩复合地基重复加卸载 $P-S$ 曲线规律

图 2 为含缺陷桩复合地基的 4 次重复加(卸)载 $P-S$ 曲线。

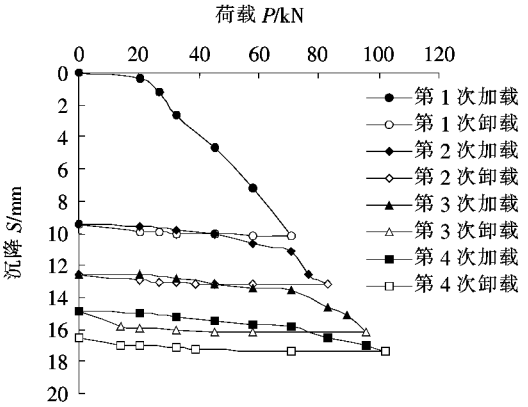


图 2 含缺陷桩复合地基 $P-S$ 曲线

由图 2 可知：

其加载曲线均呈上凸形，首次加载产生的沉降量最大，第 4 次加载产生的沉降量最小，加载沉降量随加载次数增加而减小，说明预压可以完成大部分沉降量。第 1～4 次加载终点(即第 1～4 次卸载起点)对应荷载分别为 70.59、83.17、95.75、102.04 kN，沉降分别为 10.122 5、13.198 5、16.143 5、17.362 5 mm。第 2、3、4 次加载终点均位于首次加载曲线的延长线上，卸载曲线均呈下凹形，说明含缺陷桩复合地基具有土地基相似特征，也说明测试系统正常。

3.2 临近桩顶部侧移随重复加载变化规律

图 3 为含缺陷桩复合地基上 4 次加载过程中，临近桩(A、B、C、D)顶部侧移随重复加载变化曲线对比。

由图 3 可知：

(1) 含缺陷桩复合地基 4 次加载过程中，临近桩(A、B、C、D)顶部侧移均随压力增加而逐渐增大。首次加载时，侧移增长经历 3 个阶段：低压阶段(0～30 kN)侧移呈线性增长且增长较快，这是因为模型土孔隙较大；中压阶段(30～60 kN)侧移平缓增长，压力超过一定值(60 kN)时侧移快速增长。第 2、3、4 次加载时，到达前次加载最大荷载期间，侧移缓慢增长，超过前次加载最大荷载后，侧移快速增长。所以，第 2、3、4 次加载时侧移增长经历两个阶段，曲线在前次加载最大荷载处有明显拐点。

(2) 相同条件下，嵌岩桩顶部侧移小于摩擦桩。图 3 中，嵌岩桩 A 的侧移曲线都在摩擦桩 D 曲线左侧，嵌岩桩 C 的侧移曲线都在摩擦桩 B 曲线左侧。

(3) 相比嵌岩桩，摩擦桩顶部侧移对重复加载的敏感性较强。图 3(b)、(c)、(d)中，嵌岩桩 C 和 A 的曲线变化率小，摩擦桩 B 和 D 的曲线变化率大。

(4) 相同条件下，相比桩顶自由，连梁连接桩顶产生较大侧移。图 3 中，顶部通过连梁连接的 C 桩侧移曲线都位于顶部自由的 A 桩侧移曲线右侧，顶部通过连梁连接的 B 桩侧移曲线都位于顶部自由的 D 桩侧移曲线右侧。分析认为，一方面，桩顶通过连梁连接，桩顶侧移具有叠加效应，类似于摩擦桩群沉降产生的群桩效应；另一方面，桩排的中部比两端受力稍大。

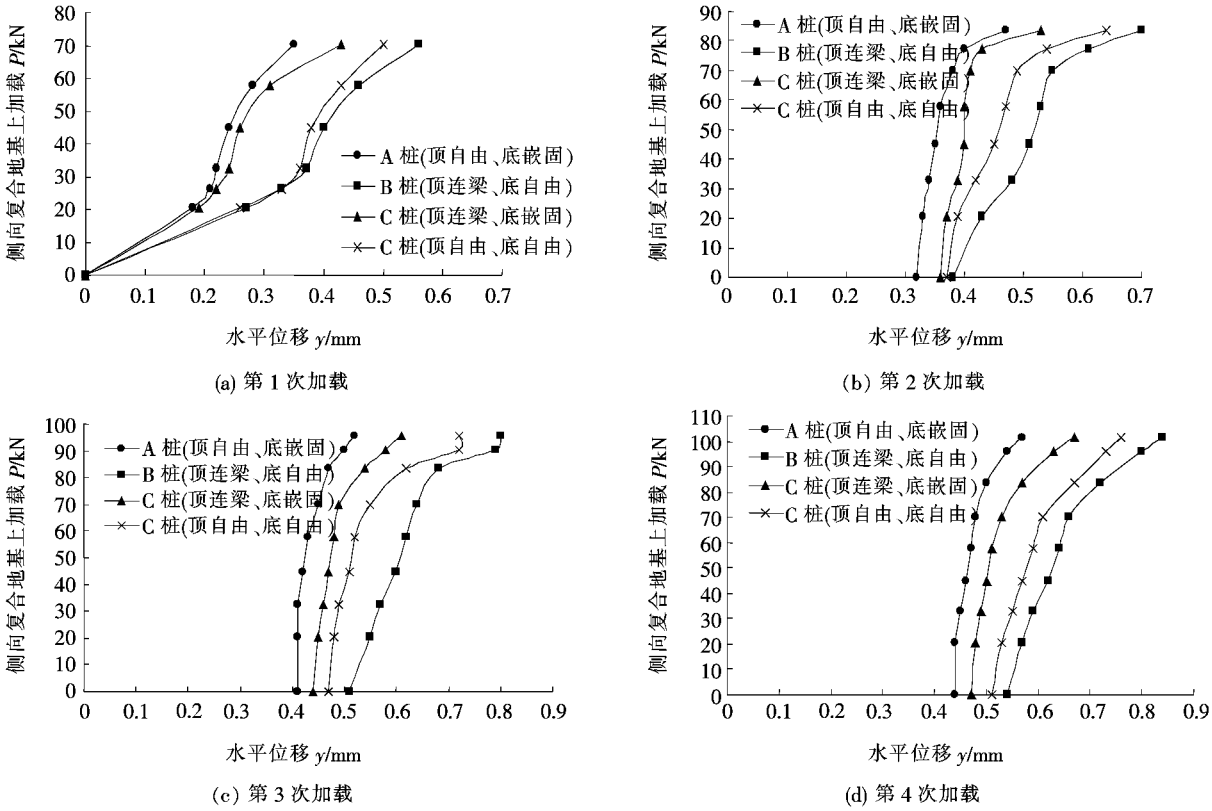
3.3 临近桩顶部侧移随重复卸载变化规律

图 4 为含缺陷桩复合地基 4 次卸载过程中，临近桩(A、B、C、D)顶部侧移随重复卸载变化曲线对比。

由图 4 可知：

(1) 卸载曲线的最后 1～2 级荷载处出现明显拐点。类似于桩体复合地基重复卸载过程中侧向约束桩侧移回弹曲线和地基土的沉降回弹曲线，卸载初期，弹性变形很小，最后 1～2 级卸载时才出现较大的弹性变形。完全卸载时，弹性变形最大。

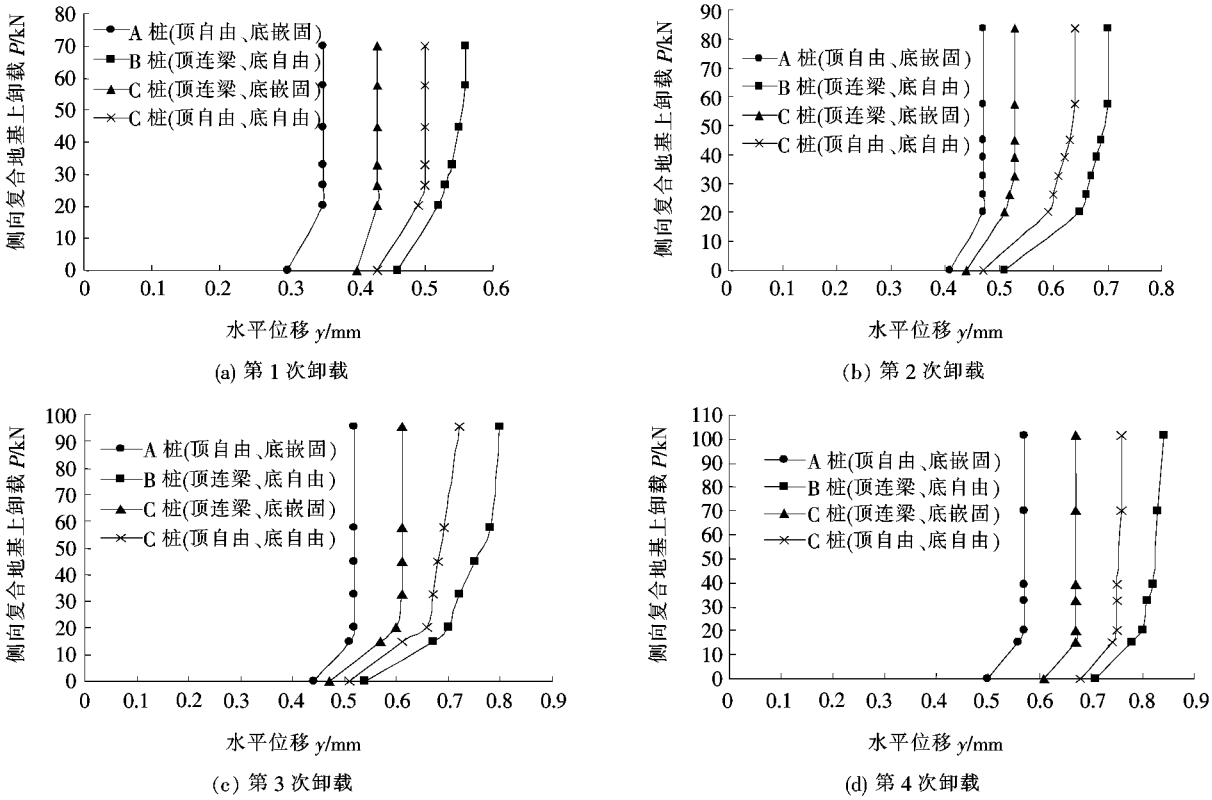
(2) 相比嵌岩桩，摩擦桩顶部侧移对重复卸载较敏感。卸载初期，摩擦桩 B 和 D 的卸载曲线表现较大的弹性变形，而嵌岩桩 C 和 A 的卸载曲线几乎与纵坐标平行，弹性变形很小。



(a) 第 1 次加载　(b) 第 2 次加载

(c) 第 3 次加载　(d) 第 4 次加载

图 3　临近桩顶部侧移随重复加载变化曲线对比



(a) 第 1 次卸载　(b) 第 2 次卸载

(c) 第 3 次卸载　(d) 第 4 次卸载

图 4　临近桩顶部侧移随重复卸载变化曲线对比

(3) 桩顶约束条件对回弹变形影响小。连梁连接桩顶的嵌岩桩 C 和桩顶自由的嵌岩桩 A、连梁连接桩顶的摩擦桩 B 和桩顶自由的摩擦桩 D,其卸载曲线几乎平行。

3.4 不同加载阶段桩顶侧移变化规律

图 5 为临近桩(A、B、C、D)在不同加载阶段的桩顶侧移变化曲线。

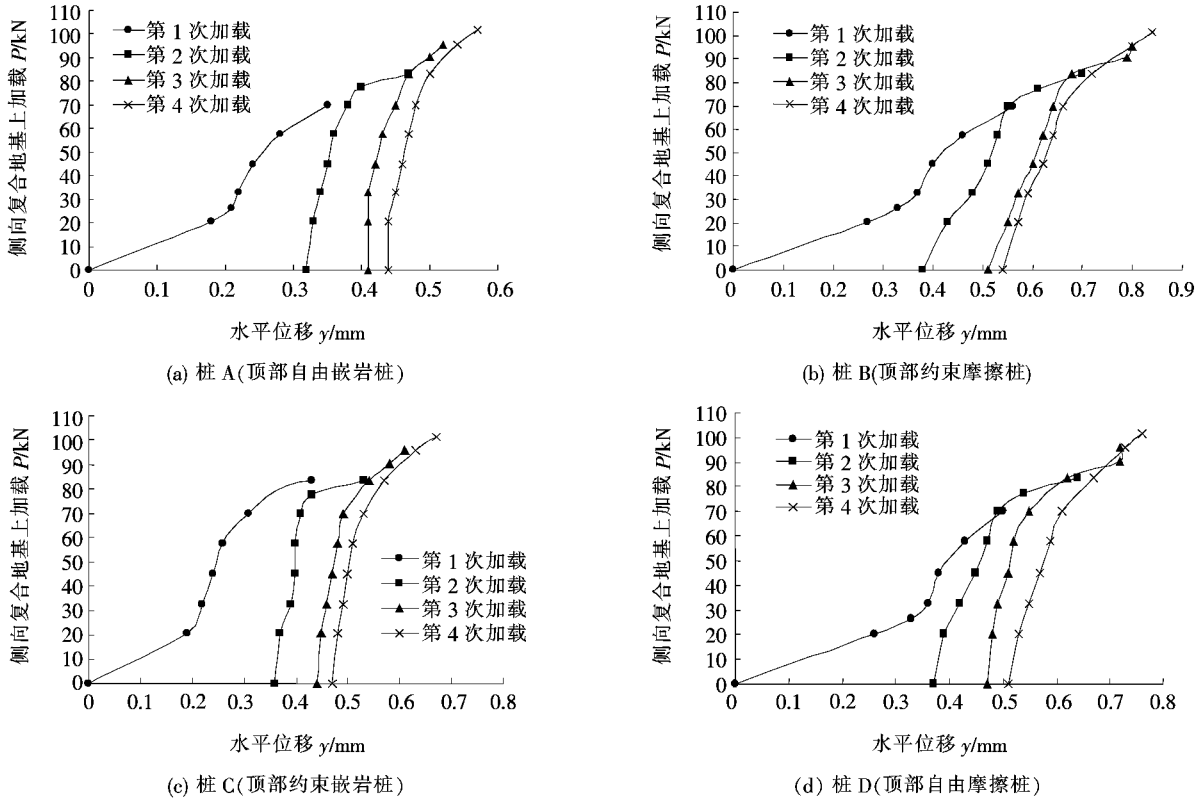
由图 5 可知:

(1) 4 次加载过程中,桩顶侧移均随加载增大而增大,其增长率随加载次数增加而减小。分析认为,前次加载期间,桩土发生了较大的塑性变形。

(2) 4 次加载过程中,若加载超过前次最大荷载,曲线将回到首次加载曲线的延长线,类似于正常桩体复合地基加载过程中侧向桩顶部侧移曲线和地基土垂直受压的沉降曲线。

(3) 相比嵌岩桩,摩擦桩对重复加载较敏感。比较图 5(a)、(d),第 2、3、4 次加载过程中,顶部自由摩擦桩 D 的侧移变化率大于顶部自由嵌岩桩 A 的侧移变化率。比较图 5(b)、(c),第 2、3、4 次加载过程中,顶部约束摩擦桩 B 的侧移变化率大于顶部约束嵌岩桩 C 的侧移变化率。

(4) 相比桩顶连梁连接的桩,桩顶自由单桩对重复加载较敏感。比较图 5(a)、(c),第 2、3、4 次加载过程中,桩顶自由的桩 A 的侧移变化率大于桩顶连梁连接的桩 C。比较图 5(b)、(d),第 2、3、4 次加载过程中,桩顶自由的桩 D 的侧移变化率大于桩顶连梁连接的桩 B。



(a) 桩 A(顶部自由嵌岩桩)

(b) 桩 B(顶部约束摩擦桩)

(c) 桩 C(顶部约束嵌岩桩)

(d) 桩 D(顶部自由摩擦桩)

图 5 4 次加载过程中桩顶侧移规律对比

3.5 不同卸载阶段桩顶侧移变化规律

图 6 为临近桩(A、B、C、D)在不同卸载阶段的桩顶侧移变化曲线。

由图 6 可知:

(1) 卸载初期,桩顶侧移基本恒定,卸载到最后 1～2级时,桩顶侧移才减小。说明高压力阶段的变形主要为不会因卸载而恢复的塑性变形。后次卸载曲线总在前次卸载曲线右侧,说明塑性变形随加载次数增加而增加。

(2) 卸载过程中,相比摩擦桩,嵌岩桩的桩顶侧移更难恢复,塑性变形的比例较高。

4 结论

(1) 含缺陷桩复合地基加卸载曲线与一般地基加卸载曲线相似,加载曲线呈上凸形,首次加载产生的沉

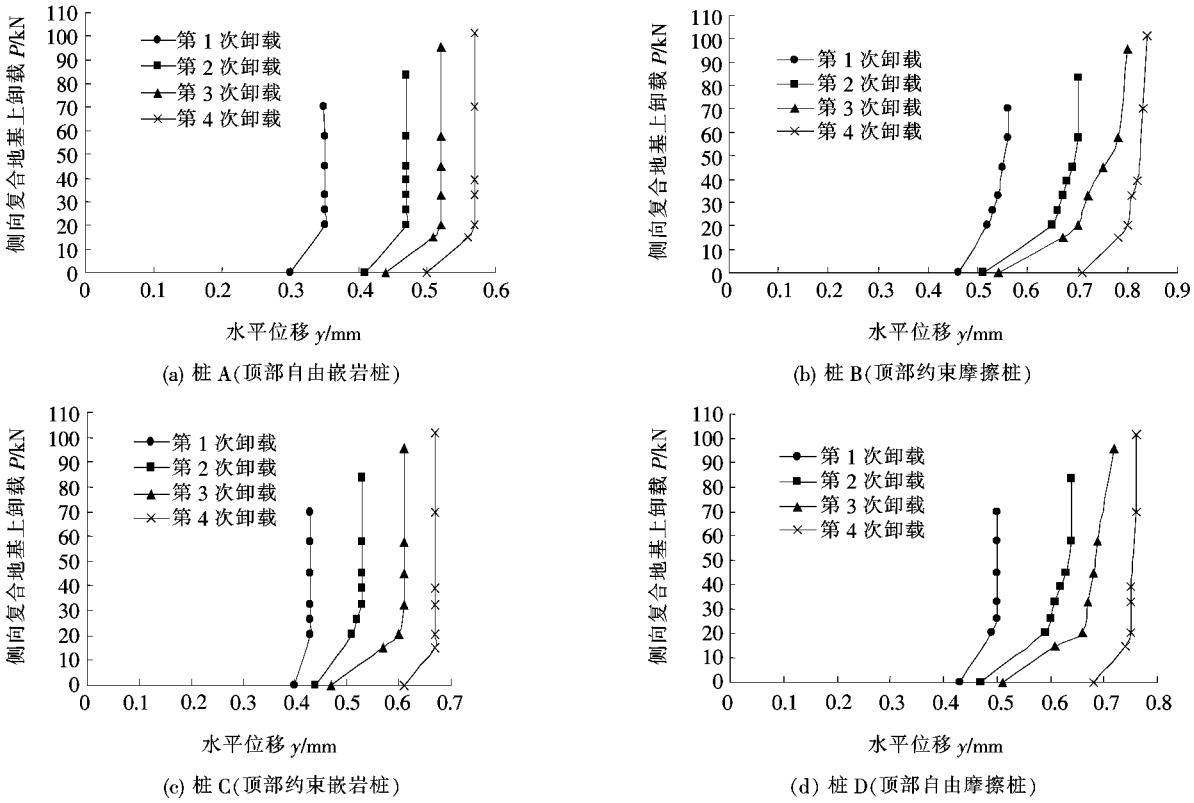


图 6　4 次卸载过程中桩顶侧移规律对比

降量最大，单次加载沉降量随加载次数增加而减小，卸载曲线呈下凹形。

（2）临近桩顶部侧移随含缺陷桩复合地基压力增加而逐渐增大。首次加载时，侧移经历快速增长、平缓增长、快速增长 3 个阶段。第 2、3、4 次加载时，侧移经历平缓增长、快速增长两个阶段。摩擦桩顶部侧移比嵌岩桩大、对重复加载敏感。顶部通过连梁连接的桩顶部侧移比顶部自由单桩大、对重复加载不敏感。桩顶侧移增长率随加载次数增加而减小。若荷载超过前次加载的最大荷载，曲线将回到首次加载曲线的延长线。

（3）卸载初期，桩顶侧移主要为塑性变形，在最后 1～2 级荷载时才开始出现弹性变形。桩顶约束条件对回弹变形影响小。

（4）嵌岩桩比摩擦桩的侧向约束效果好。桩顶通过连梁连接比桩顶自由单桩产生较大位移，对重复加载不敏感。实际工程中，复合地基内缺陷桩很多时，建议在侧面设置顶部通过连梁连接的嵌岩桩控制含缺陷桩复合地基的水平移动。

（5）首次通过室内模型试验，揭示了含缺陷桩复合地基重复加卸载曲线特征，获得了临近嵌岩桩、摩擦桩及其桩顶自由或者通过连梁连接时顶部水平位移变化规律，可为临近桩设计提供试验依据。

参考文献：

[1] 周德泉，段高飞，冯晨曦，等.竖向重复加卸载下倾斜桩复合地基变形规律试验[J].中国公路学报，2019(3).

[2] 丁光文，唐艳.粉喷桩侧向约束在软土地基加固中的运用[J].路基工程，1999(1).

[3] 周德泉，周果子.一种加固倾斜软基的组合型复合地基[P].中国，2016213280147.

[4] POULOS H G.Analysis of Piles in Soil Undergoing Lateral Movement[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division，ASCE，1973，99(SM5)：391－406.

[5] MATSUI T，HONG W P，ITO T. Earth Pressure on Piles in a Row Due to Lateral Soil Movements[J].Soils and Foundations，1982，22(2)：71－81.

[6] ITO T，MATSUI T. Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Piles[J]. Soils and Foundations，1975，14(4)：43－59.

[7] Bransby M.F.& Springman S.M.3－D Finite Element Modeling of Pile Groups Adjacent to Surcharge Loads[J]. Computer and Geotechics，1996，19(4)：301－324.

[8] 李国豪.关于桩的水平位移、内力和承载力的分析[J].力学季刊，1981(1).

DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.004

透水性混凝土桩在黄泛区粉性土地基中的加固机理及效果研究

张宏博[1,2]，刘源[1,2]，陈晓光[3]，葛智[1,2]，宋修广[1,2]

(1.山东大学 土建与水利学院，山东 济南 250061；2.山东省路基安全工程技术研究中心；3.山东省电力工程咨询院有限公司)

摘要：透水性混凝土桩兼顾高强度与透水性，应用在以粉土、粉质黏土为主的黄河冲击平原区能有效地加速土体固结，减少工后沉降。为了从机理上对透水性混凝土桩应用于黄泛区平原地基处治的效果进行研究，基于室内模型试验，填料选用粉质黏土并分层进行注水、静置，确保其完全饱和，透水性混凝土桩体选择3种不同的空隙率，采用快速荷载法分级加载，对透水性混凝土桩复合地基承载特性及桩周土孔隙水压力消散规律进行了研究。得出如下结论：透水性混凝土桩能显著提高复合地基承载力，提高幅度在80%以上；加载过程中桩周土体的超静孔压得到了迅速的消散，桩周土体强度较原始强度提高了60%左右，且影响区域的半径在2.5倍桩径以上。

关键词：透水性混凝土；粉质黏土地基；复合地基承载力；固结沉降；模型试验

黄河冲积平原广泛分布于鲁西和鲁北，土质条件以粉质黏土、粉土为主，局部含淤泥夹层，土层深厚，地下水位较高，地表排水不畅。大量实测数据表明：该地区的地基强度低、固结速率慢，土质属高压缩性土。在其上直接修筑路基工程，地基承载力不足、工后沉降大，从而引起桥头跳车、路基失稳等病害，严重影响道路交通安全，加速路面结构破坏。为解决该问题，该地区常用地基处理方案主要有强夯法、复合地基法、排水固结法(堆载预压)等。强夯法经济、快速，但处理深度有限且高地下水位应用效果不佳；复合地基法建设费用高，处理深度较深。复合地基法以浆(粉)喷桩，CFG桩居多，这两类桩对控制加固区固结沉降效果较好，但同时由于增加了桩底下卧层的固结沉降，应用效果并不理想。排水固结法受建设工期限制，许多工程难以实施。因此，如何合理、有效地控制该区域路基工后沉降成为首要问题。

随着透水性混凝土路面的提出，由于透水性混凝土强度较高(E_C＝10～20 MPa)，透水系数较大(0.1～0.5 cm/s)，该材料逐渐被作为桩体应用于复合地基中。其作用机理为：透水性混凝土桩体兼具散体桩与

[9] 杨敏，朱碧堂，陈福全.堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析[J].岩土工程学报，2002(4).

[10] 杨敏，朱碧堂.堆载下土体侧移及对邻桩作用的有限元分析[J].同济大学学报，2003(7).

[11] 周健，亓宾，曾庆有.被动侧向受荷桩模型试验及颗粒流数值模拟研究[J].岩土工程学报，2007(10).

[12] 王恺敏，王建华，陈锦剑，等.大面积堆载作用下饱和土中的桩基工作性状[J].上海交通大学学报，2006(12).

[13] 李忠诚，梁志荣.大面积堆载土体侧移模式及对邻近被动桩影响分析[J].岩土工程学报，2010(增刊1).

[14] 梁发云，黄茂松.被动单桩受轴向荷载作用耦合效应的初步分析[J].地下空间与工程学报，2010(1).

[15] 吴琼.侧向堆载作用下竖向受荷桩的受力性状[D].上海交通大学硕士学位论文，2011.

[16] 周德泉，颜超，罗卫华.复合桩基重复加卸载过程中临近桩变位规律试验研究[J].岩土力学，2015(10).

[17] 周德泉，黎冬志，冯晨曦，等.侧向重复加卸载下顶部约束双排倾斜摩擦桩变位规律试验研究[J].中外公路，2019(1).

[18] JGJ 79－2012 建筑地基处理技术规范[S].

[19] 周德泉，肖宏宇，雷鸣，等.重复加卸载条件下全风化泥质砂岩累积变形与湿化规律试验研究[J].岩石力学与工程学报，2013(3).

收稿日期：2018－09－15

基金项目：国家自然科学基金资助项目(编号：51208284)；山东省科技发展计划项目(编号：2013GSF11603)

作者简介：张宏博，男，博士，副教授.E－mail：zhanghongbo@sdu.edu.cn