

临海漫滩回填堆载对临近桩基的影响分析

庞 锋¹, 孙 凯^{2,3}

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014;

2. 锦艺置业集团有限公司, 上海 200000;

3. 郑州大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001)

摘 要: 软土地基地面堆载会引起地基土压缩和侧向位移, 土体的侧移又会进一步导致临近桩基承载性能发生改变。为了考察沿海漫滩回填堆载导致的地基软弱土压缩和侧向移动作用下的临近既有桩基受力性状, 采用有限元分析软件 ABAQUS 建立了堆载作用下临近桩基的三维有限元模型, 分析了堆载作用下软弱地基土的变形迁移规律, 研究了临近堆载单排桩、双排桩在堆载荷载大小与作用位置、桩身刚度、桩顶约束条件等工况中的性状。结果表明, 堆载作用位置越近、荷载水平越高, 桩身变形受力响应越明显; 桩身刚度的提高会增加被动受荷影响范围; 不同桩顶承台约束下桩身变形受力性状差异显著, 且桩身轴力引起的“二次弯矩”效应明显, 不容忽视。当基底软弱土较厚时, 采用水泥搅拌桩加固有利于改善临近桩基变形受力性状。

关键词: 软土地基; 堆载; 被动桩; 数值分析

中图分类号: TU473.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)02—0093—08

Influence of Surcharge Load on the Adjacent Pile Foundation in Coastal Floodplain

PANG Feng¹, SUN Kai^{2,3}

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210014, China;

2. Jinyi Real Estate Group Co., Ltd., Shanghai 200000, China;

3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, He'nan 450001, China)

Abstract: The surcharge load on soft ground will cause the compression and horizontal displacement of the ground soil, and this horizontal displacement will further lead to the change of the bearing performance of adjacent pile foundation. In order to investigate the behavior of existing piles caused by the horizontal and compression deformation of soft substratum due to backfill surcharge on coastal floodplain, finite element analysis software ABAQUS was used and three-dimensional finite element model of pile adjacent to surcharge load was established. The deformation and migration law of soft soil was analyzed. The behavior of single pile and double row pile adjacent to surcharge load were studied, in which the influence of surcharge load location, surcharge pressure, pile stiffness, and pile top constraint conditions were considered. The results show that as the position of surcharge load is closer and the surcharge pressure increases, the response (e.g. deformation and bending moment) is more obvious. With the increase of pile stiffness, the range of passive load is increased. The deformation behavior of pile body under different constraints of pile cap is significantly different. The effects of secondary bending moment caused by pile axial force is obvious and cannot be ignored. If there is a thick soft substratum, it is beneficial to improve the behavior of adjacent piles by using cement mixing pile reinforcement.

Keywords: soft soil foundation; surcharge load; passive pile; numerical analysis

在软土地区,地面堆载往往会引起软弱地基土产生侧向位移而使邻近桩基发生侧向变位、桩基的承载性能发生明显改变,原本按抗压承载和沉降控制的竖向抗压桩,可能转变为水平附加被动荷载控制的水平抗弯桩,这种既承担上部结构主动荷载作用,又承受因周围土体侧向位移而产生的附加被动荷载作用的桩,属于典型的被动桩^[1]。被动桩的工程性状不仅涉及桩与土在三维空间相对复杂的相互作用问题,而且还需考虑主动、被动荷载的耦合作用效应,如不进行合理评估,极易引发严重的工程事故。如张家港某高速公路枢纽高架桥因互通匝道路基边载,引发了跨线桥墩柱偏移事故^[2];某高速铁路特大桥局部桩基(9#和10#)因大面积单侧堆载引发的严重偏移事故^[3]等。尤其是近年来随着沿海地区工业化、城市化的迅猛发展,围海造地、圈圩成路开发沿海土地成为缓解土地资源紧张的重要方式,堆填、抛填、吹填陆域工程越来越多,而我国现行的设计规范中尚未涉及桩周土体侧移不利影响的充分考虑,因此回填堆载对附近建筑物的影响,特别是堆载对邻近桩基性状的影响,已成为当下研究的热门课题。

由于软土地基土质复杂多变,上部结构形式不一,采用模型试验很难得出可靠结论,有限元数值模型分析成为研究该问题的较为理想的方法。杨涛等^[4]使用数值分析法求解得到了堆载及开挖卸荷条件下被动桩处的水平附加应力;张超凡^[5]将位移法和 $p-y$ 曲线法相结合研究分析了被动桩的内力和变形;陈福全等^[6]采用二维数值模型分析了不同工况下堆载对附近单、双排桩的影响;周德泉等^[7]通过模型试验分析了侧向荷载下双排桩桩身受力特性;Kelesogu 等^[8]建立了三维数值模型分析了路基填筑时桥台桩基的被动受荷响应;郑健龙等^[9]、刘维娟等^[10]和曹琪等^[11]亦采用三维数值模型分析了路基填筑对附近排桩的影响,但未涉及实际工程中排桩桩顶约束的影响。

本文结合深圳某临海漫滩回填造陆工程,利用三维有限元软件 ABAQUS,建立了堆载作用下邻近桩基变形受力特性分析模型,揭示了堆载作用下基底软弱土的运移规律,并系统分析了工程中漫滩蓄泥区填土堆载对邻近高速公路高架桥桩基的影响效应,为合理评估堆载对邻近桩基的影响提供依据。

1 工程背景与模型构建

1.1 工程概况

深圳某临海漫滩回填造陆工程位于宝安大空港地区的西北海滨区,场地原始地貌为珠江口滨海浅滩-潮间带,属淤泥滩区域,其东侧为海积冲击平原地貌。场区地形较为复杂,原始场地主要由养殖鱼塘及河涌组成,地表水体发达。图 1 为该工程平面位置示意图,场区由 A、B、C、D 四个弃土回填区组成,沿江高速在场区东侧穿越。其中, A 区、C 区、D 区为一期回填场区,皆位于沿江高速公路高架桥的西侧,场区边界距高架桥距离约 200 m~230 m,回填区宽度最大可达 200 m; B 区为二期回填场区,场区内有沿江高速二期沙井互通立交。可见,造陆场区回填区域面积大、分布广,对邻近沿江高速公路高架桥稳定性的影响不容忽视。

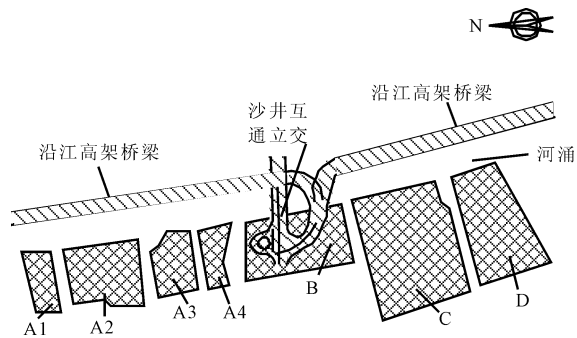


图 1 工程平面示意图

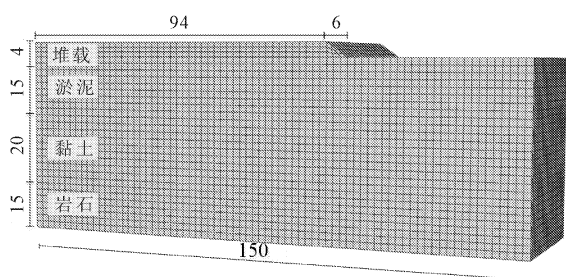
根据相关工程资料,陆域形成的回填料土质一般采用吹填疏浚物,回填砂石料、回填建筑渣土或弃土等,土质基本要求为:天然含水率不大于 50%,有机质含量不大于 10%,且如果含块石,块石粒径应小于 30 cm(粒径处于 2 cm~30 cm 的含量不得超过 10%)。场区主要地层及其岩土层物理力学指标见表 1,场区中分布有欠固结、低强度、自稳能力较差的淤泥层(②₁和②₂,厚度 12 m~18 m)和有机质黏土层(④,厚度 18 m~22 m),在工程施工、填土附加荷载等工况下,易发生固结沉降与侧向挤出^[12-15]。因此,在陆域形成回填施工中,需考虑基底软弱土对邻近桥梁基础的不利影响。

1.2 有限元模型

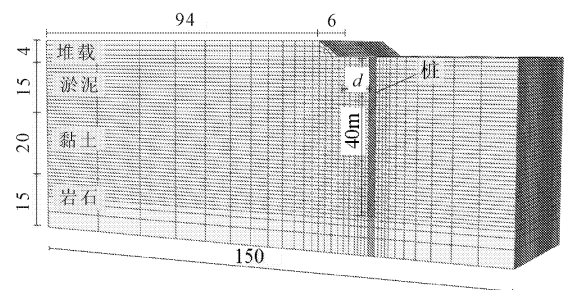
为了系统分析回填堆载对邻近桩基的影响效应,结合现场工况,采用大型三维有限元软件 ABAQUS,分别建立无桩堆载作用模型、邻近堆载单桩模型和邻近堆载桥梁排桩模型,如图 2 所示。

表 1 各岩土层物理力学指标

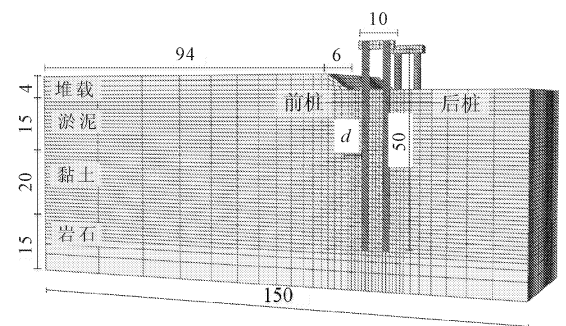
| 层序号 | 地层名称及成因代号 | 岩土状态 | 承载力标准值 f_k/kPa | 压缩模量 E_s/MPa | 变形模量 E_s/MPa | 黏聚力 c/kPa | | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | |
|----------------|----------------------------|-------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------|---------------------------|------|
| | | | | | | 直剪快剪 | 固结快剪 | 直剪快剪 | 固结快剪 |
| ① | 人工填土(Q^{ml}) | 松散 | 70 | 4.0 | 4.5 | 8.0 | 8.0 | 15.0 | 15.0 |
| ② ₁ | 淤泥(Q_4^{mc}) | 流塑 | 20 | 1.2 | 1.2 | 3.0 | 9.2 | 5.3 | 6.4 |
| ② ₂ | 淤泥(Q_4^{mc}) | 流塑 | 35 | 1.7 | 1.7 | 5.8 | 12.6 | 4.5 | 6.3 |
| ③ | 黏土($Q_3^{\text{al+pl}}$) | 可塑 | 160 | 5.5 | 10.0 | 30.2 | 33.7 | 5.6 | 9.4 |
| ④ | 淤泥质黏土(Q_3^{h}) | 流塑 | 60 | 2.5 | 2.5 | 10.5 | 19.3 | 4.7 | 5.0 |
| ⑤ ₂ | 粉砂($Q_3^{\text{al+pl}}$) | 松散—稍密 | 140 | — | 15.0 | 10.0 | 15.0 | 12.0 | 16.3 |
| ⑥ | 粉质黏土(Q^{cl}) | 可塑—硬塑 | 200 | 8.0 | 22.0 | 20.2 | 19.8 | 18.8 | 17.1 |
| ⑦ ₁ | 片麻岩(ChF) | 全风化 | 350 | 13.0 | 70.0 | 35.0 | 35.0 | 28.0 | 28.0 |
| ⑦ ₂ | 片麻岩(ChF) | 强风化 | 500 | 18.0 | 180.0 | 45.0 | 45.0 | 33.0 | 33.0 |



(a) 无桩时堆载作用模型



(b) 邻近堆载单桩模型



(c) 邻近堆载桥梁排桩模型

图 2 有限元模型(单位:m)

模型总长度为 150 m,宽度取为 60 m;依据工程回填设计方案,考虑到场区最大回填区宽度为 200 m,基于对称性原理,模型中回填堆载长度取 100 m,其中坡宽 6 m,坡率 1:1.5。为便于分析,根据土层性状将场区地层简化为淤泥层(厚 15 m)、黏土层

(厚 20 m)和硬土层/岩层。桩体参数根据实际工程设计资料统一取桩长 40 m、桩径 2 m,桩身刚度 30 GPa。其中,“邻近堆载桥梁排桩模型”中考虑桥梁承台与上部立柱的约束影响,桩顶设置长度 10 m 立柱和承台,前后排桩间距 6 m,前桩距堆载距离 $d = 10$ m,立柱承台与立柱采用固定连接,如图 2(c)所示。建立模型时,堆载与桩身为线弹性体,地基土体为弹塑性材料,服从 Mohr-Coulomb 屈服准则;桩土界面接触的法向模型选用硬接触,切向模型选用 Coulomb 摩擦模型,使用摩擦系数来表示,其中桩基与淤泥土、黏土、岩石界面摩擦系数分别为 0.20、0.35 和 0.50。为提高计算效率,根据工程地质资料对场区土层进行了整合,模拟分析中将地层划分为淤泥层、黏土层和桩底强风化岩层,具体计算参数如表 2 所示。有限元模型的边界条件,底部设置为固定边界,四周为水平固定边界。由于工程为围海造地工程,为便于分析,忽略地下水和土体渗透性的影响。

表 2 计算参数选取

| 土层 | 密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | 弹性模量 E/MPa | 泊松比 | 内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$ | 黏聚力 c/kPa | 膨胀角 $\psi/(\text{°})$ |
|----|---|---------------------|------|---------------------------|--------------------|-----------------------|
| 堆载 | 1.5 | 40 | 0.30 | — | — | — |
| 淤泥 | 1.5 | 15 | 0.40 | 6 | 15 | 0.1 |
| 黏土 | 1.8 | 80 | 0.30 | 10 | 30 | 0.1 |
| 岩层 | 2.5 | 200 | 0.25 | 33 | 45 | 0.1 |
| 桩 | 2.5 | 30000 | 0.20 | — | — | — |

2 堆载作用效应分析

如图 3 所示为设计回填堆载作用($h = 4$ m, $p = 90$ kPa)下基底地层的位移云图。可以看出,在回填堆载作用下基底地层出现明显的沉降变形和侧向位移。

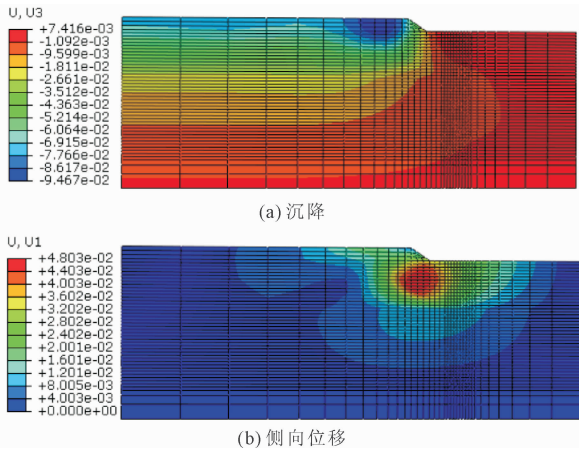


图3 地层变形云图

以堆载坡脚为坐标原点,提取不同深度处地层沉降变形,如图4所示。在回填堆载作用下,下部地层沉降明显,但随土层深度的增加沉降变形呈逐渐减小的变化趋势;而在邻近堆载的局部区域土体出现隆起,说明伴随沉降变形的发生,基底土体产生侧向挤出。

图5为距堆载不同距离处土体侧移曲线。随距堆载距离的增加,土体侧向位移不断减小,当堆载距离大于120 m时,土体侧移趋近于零。本工程中A区、C区、D区距沿江高速公路高架桥距离大于200 m,可认为其回填堆载对附近桥梁桩基基本没有影响。然而,在B场区中存在沿江高速公路高架桥沙井互通立交,后期施工中回填堆载对互通立交桥梁桩基的影响不容忽视。

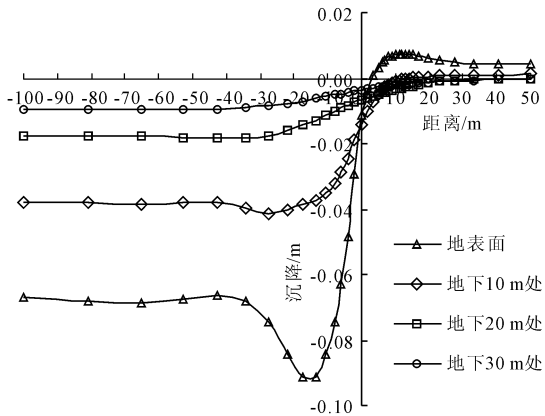


图4 不同深度土层沉降曲线

3 单桩影响响应

为了进一步揭示堆载对邻近桩基工作性状的影响,基于邻近堆载单桩有限元模型分别对堆载距离、桩身刚度和堆载荷载水平等影响因素进行分析。

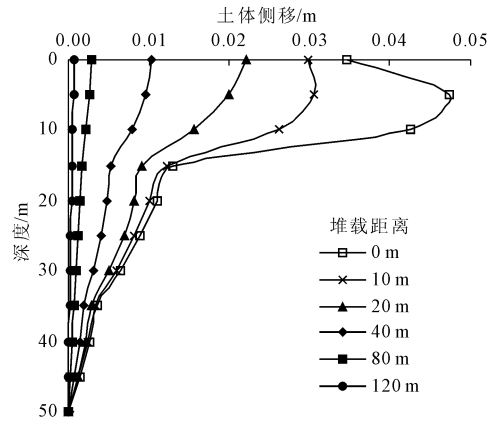


图5 距堆载不同距离处土体侧移曲线

3.1 堆载位置

考虑堆载位置对桩身性状的影响,对比分析距堆载距离 $d=0\text{ m}$ 、 10 m 、 20 m 和 40 m 的工况,得出不同堆载位置时桩身侧移变化曲线和弯矩变化曲线,如图6所示。

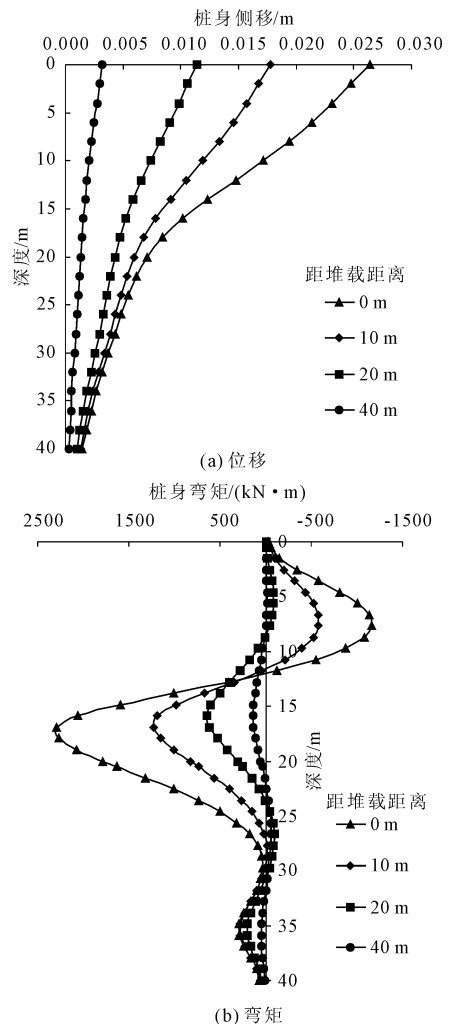


图6 距堆载不同距离下的桩身侧移和桩身弯矩曲线

图 6(a)为桩身侧移随堆载距单桩距离变化的关系曲线。桩身侧移随距堆载距离的增加逐渐减小,当紧邻堆载时($d=0$ m),桩身最大侧移为 26.4 mm,分别比距离为 10 m、20 m、40 m 的最大侧移增加了 48.3%、130% 和 750%,说明堆载距离对桩身变形性状的影响较为明显。

图 6(b)为桩身弯矩随堆载距单桩距离变化的关系曲线。桩身最大弯矩值位于淤泥层和黏土层分界处,距堆载 0 m 的桩身最大弯矩为 2 264 kN·m,分别比距离为 10 m、20 m、40 m 的最大弯矩增加了 83.6%、270% 和 1 600%,且最大弯矩值的位置随堆载距离的减小逐渐下移,桩身受力变化明显,受被动荷载影响的范围增加。

3.2 桩身刚度

当堆载距离为 10 m 时,保持其它参数不变,改变桩身刚度,分析桩身刚度为 1 GPa、5 GPa、10 GPa、20 GPa 和 30 GPa 时堆载作用下桩身的侧移与弯矩变化规律。

图 7(a)为桩身侧移随桩身刚度变化的关系曲线,可以看出,桩身刚度大于 10 GPa 时,侧移曲线呈由上而下逐渐减小的变化趋势,桩身最大位移发生在桩顶;而当桩身刚度小于 10 GPa 时,侧移曲线呈抛物线型分布,桩身最大位移发生在淤泥层中部。

考虑桩身刚度对桩身弯矩的影响,桩身刚度为 30 GPa 时桩身最大弯矩为 1 233 kN·m,分别比桩身刚度为 20 GPa、10 GPa、5 GPa、1 GPa 的最大弯矩增加了 22.9%、77.4%、170% 和 800%,说明桩身弯矩随桩身刚度的增加而增大;最大弯矩值基本位于淤泥层和黏土层分界处,且桩身最大弯矩值的位置随桩身刚度的增大逐渐下移,受被动荷载影响的范围增加,如图 7(b)所示。

3.3 堆载荷载水平

考虑堆载荷载水平的影响,分析荷载水平分别为 60 kPa、90 kPa、120 kPa、150 kPa 及 180 kPa 时堆载作用下桩身的侧移与弯矩变化规律。

图 8(a)为桩身侧移随堆载荷载水平变化的关系曲线。桩身侧移主要发生在淤泥层中,最大侧移位于桩顶位置;堆载荷载水平越大,桩身侧移越大,当荷载水平为 180 kPa 时,桩身最大侧移变形高达 9.7 cm,分别比荷载水平为 150 kPa、120 kPa、90 kPa、60 kPa 的最大侧移增加了 34.7%、94.0%、200% 和 470%。

图 8(b)为桩身弯矩随堆载荷载水平变化的关系曲线。随着堆载荷载水平的增加,桩身弯矩呈增

大的变化趋势,当荷载水平为 180 kPa 时,桩身的最大弯矩值为 8 239 kN·m,分别比荷载水平为 150 kPa、120 kPa、90 kPa、60 kPa 的最大弯矩增加了 37.9%、100%、250% 和 600%。桩身最大弯矩值位于淤泥层和黏土层分界处,且反弯点的位置随荷载增大逐渐上移,堆载荷载越大,桩身受堆载影响范围越大。

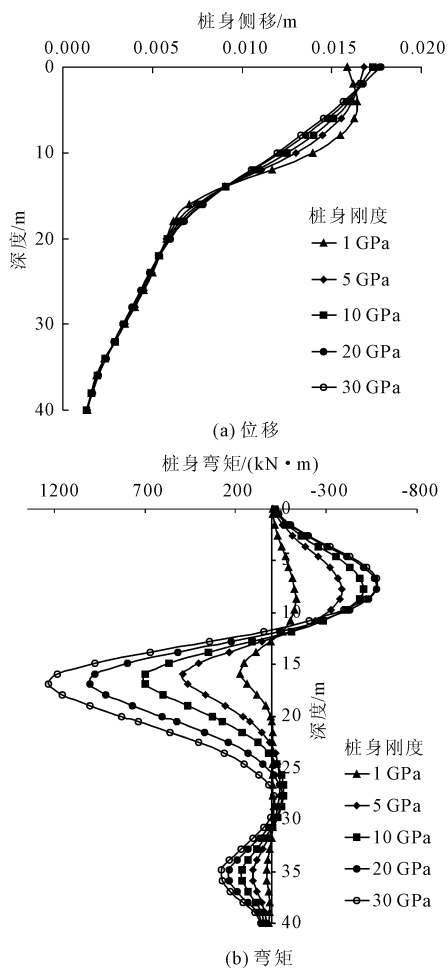


图 7 不同桩身刚度下的桩身侧移和桩身弯矩曲线

4 桥梁排桩的影响响应

与单桩相比,桥梁排桩的受力结构更为复杂,在实际工程中往往需考虑承台约束与上部结构荷载的影响。

4.1 承台约束影响

图 9 为不同承台约束情况下桥梁排桩的侧移曲线和弯矩曲线。由图 9(a)可以看出,承台约束对桩身变形性状的影响明显,当桩顶固定时桩身的最大侧移位于淤泥层和黏土层分界处附近,而桩顶自由时桩身最大侧移位于桩顶;且与桩顶自由情况下的桩身侧移曲线对比,桩顶固定时的前后桩最大侧移

分别减小 50.7% 和 108.0%。

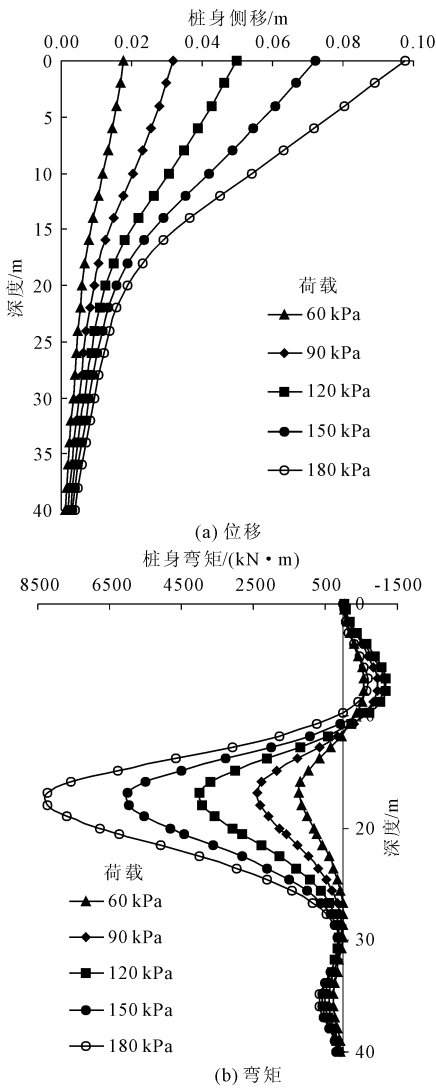


图 8 不同堆载荷载水平下桩身侧移与弯矩曲线

图 9(b) 和图 9(c) 分别为桩顶固定和桩顶自由时前、后桩弯矩曲线。当桩顶固定时,前、后桩的桩顶都产生弯矩作用,且前、后桩的最大负弯矩皆位于淤泥层和黏土层分界处附近;而桩顶自由时,前桩的最大弯矩位于土层分界处附近,但量值减小了 52.0%,后桩的最大弯矩位于桩顶,量值减小了 48.0%。可见,桩顶固定虽然可以明显约束桩身变形,但同时亦会增大桩身弯矩。

4.2 承台主动荷载影响

鉴于桩身轴向荷载会对侧向被动受荷桩产生“二次弯矩”效应,进而考虑上部结构对桩基的竖向荷载作用,分析中分别在桩顶施加竖向荷载 1 000 kPa、1 500 kPa 及 2 000 kPa。

如图 10 所示,桩顶固定约束下,桩顶施加主动竖向荷载会使桩身侧移增大,与桩顶自由情况相比,

施加 1 000 kPa、1 500 kPa 及 2 000 kPa 竖向荷载,前桩侧移分别增加 7.7%、9.8%、12.4%,后桩侧移分别增加了 9.8%、12.9%、16.6%,但影响范围主要集中在淤泥层中。

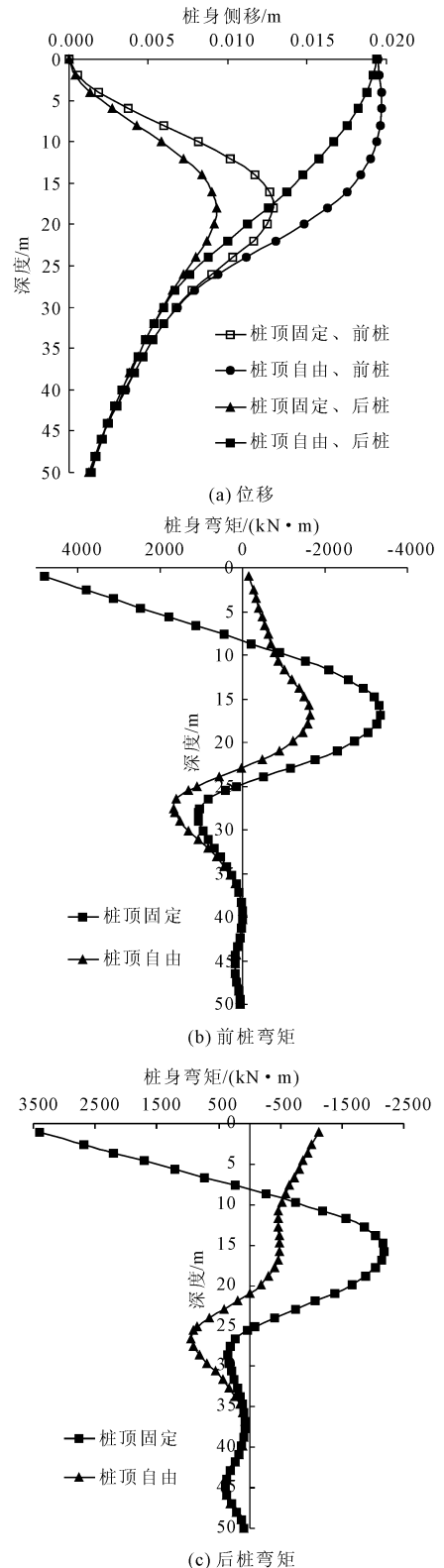


图 9 桩顶约束影响

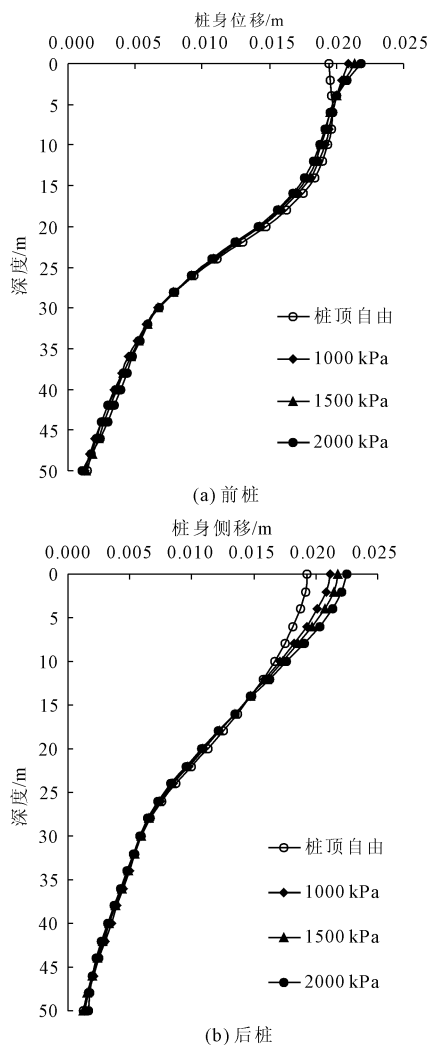


图 10 桩顶竖向荷载对桩身侧移的影响

如图 11 所示为不同竖向荷载水平下前、后桩的弯矩分布曲线。桩顶施加竖向荷载会引起桩身弯矩发生显著变化,随着竖向荷载水平的增加,桩身最大弯矩呈增大的变化趋势;且当桩顶固定约束时,与桩顶自由情况相比,施加 1 000 kPa、1 500 kPa 及 2 000 kPa 竖向荷载,前桩桩顶弯矩分别增加 8 倍、12 倍和 16 倍,后桩桩顶弯矩增加了 47.3%、72.4%、98.0%;桩身轴力产生“二次弯矩”效应显著。

4.3 地基加固影响

考虑对基底软弱土的加固,水泥土搅拌桩是一种利用率较高的地基加固措施。在上述“邻近堆载桥梁排桩有限元模型”基础上,分析基底软土进行水泥搅拌桩加固处理后的影响。其中,水泥搅拌桩桩长 20 m,桩径 0.5 m,桩间距 2 m。

图 12 为有无水泥搅拌桩加固下前、后桩侧移对比曲线。可以看出,采用水泥搅拌桩加固后,桥梁桩基的前桩和后桩侧移发生了明显的变化;无地基加

固时,桥梁桩基的前桩最大侧移为 10.46 mm,后桩的最大侧移为 10.41 mm,进行水泥搅拌桩处理加固后,桥梁桩基的前桩最大侧移减小至 4.19 mm,后桩的最大侧移减小至 4.17 mm,最大侧移量减小了约 60%。根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》有关规定:在消除结构自重产生的长期挠度后梁式桥主梁的最大挠度处不应超过计算跨径的 1/600,经验算采用水泥搅拌桩加固后的排桩侧移量满足标准的限定值。说明地基加固处理(水泥搅拌桩)对基底软弱土具有良好的改善作用,可降低临近桩基的受力响应。

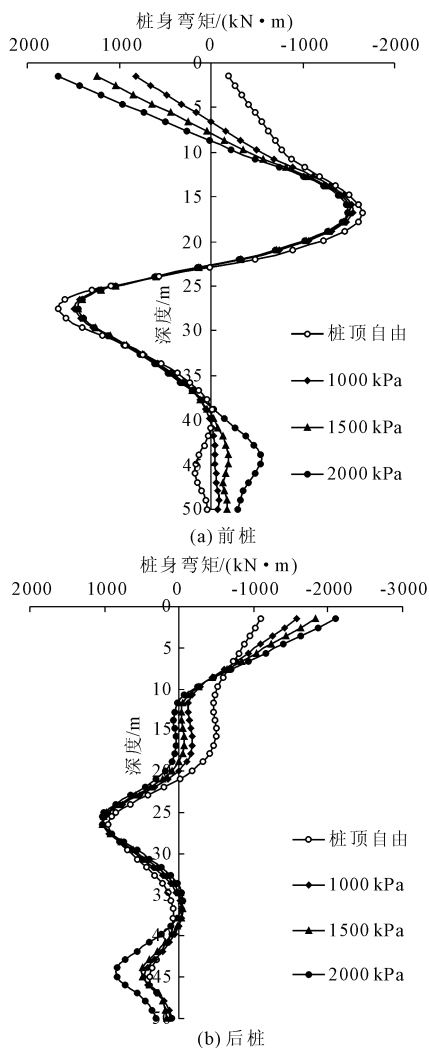


图 11 桩顶竖向荷载对桩身弯矩的影响

5 结 论

本文依据深圳某临海漫滩回填造陆工程,采用大型三维数值计算软件 ABAQUS 系统分析了软土地基上填土堆载对临近桩基的影响效应,主要得出以下结论:

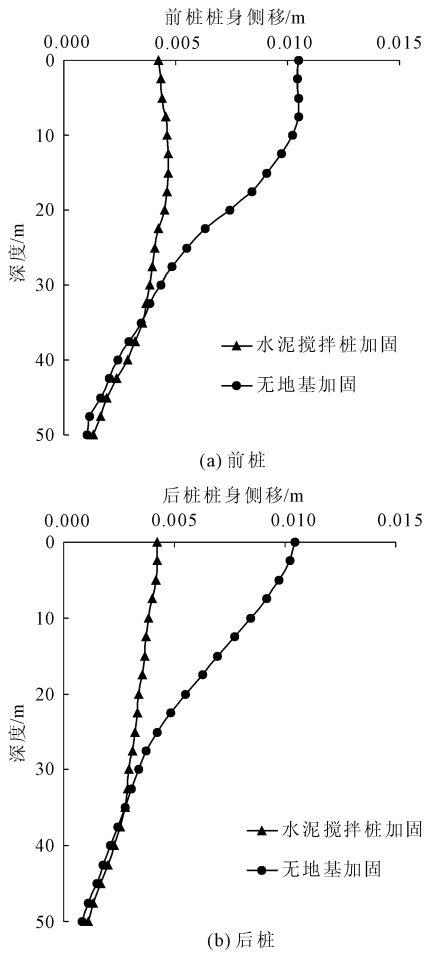


图 12 地基加固对桩身变形的影响

(1) 堆载位置与荷载水平影响效应显著,堆载位置越近、荷载水平越高,桩身变形受力响应越明显,在回填工程设计中应与既有桩基间预留充分距离 (>120 m),降低堆载附加荷载效应的影响。

(2) 堆载作用下临近桩基上部结构的约束作用影响显著,针对桥梁桩基应根据不同柱顶支座约束开展设计验算,且桩身轴力引起的“二次弯矩”效应明显,不容忽视。

(3) 地基加固处置(水泥搅拌桩)对基底软弱土具有良好的改善作用,可明显降低堆载作用下临近桩基的被动受荷效应。

参考文献:

[1] Zhang H, Shi M L, Guo Y C. Semianalytical solutions for abutment piles under combined active and passive

loading [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2020, 20(10):04020171.

[2] 张浩,石名磊,郭院成. 边载作用下桥梁桩基-立柱的位移特征与受力分析[J]. *岩土力学*, 2017, 38(9): 2683-2692.

[3] 董亮,牛斌,谷牧. 大面积单侧堆载对高速铁路桥梁墩台影响的数值分析[J]. *铁道建筑*, 2015(1): 39-42.

[4] 杨涛,童立元,潘皇宋. 堆载及基坑开挖作用下被动桩水平受力及变形响应[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(3): 449-455.

[5] 张超凡. 考虑土体非线性时被动桩内力和变形特性计算[J]. *土木工程与管理学报*, 2021, 38(1): 127-133.

[6] 陈福全,杨敏. 地面堆载作用下邻近桩基性状的数值分析[J]. *岩土工程学报*, 2005(11): 51-55.

[7] 周德泉,肖灿,冯晨曦,等. 侧向堆载下斜桩长度影响斜-直双排桩受力响应试验研究[J]. *公路交通科技*, 2021, 38(2): 24-32.

[8] Kelesoglu M K, Springman S M. Analytical and 3D numerical modelling of full-height bridge abutments constructed on pile foundations through soft soils[J]. *Computers and Geotechnics*, 2011, 38(8): 934-948.

[9] 郑健龙,张军辉,李雪峰. 软基桥头路基填筑对桥台桩的影响[J]. *中国公路学报*, 2013, 26(2): 48-55.

[10] 刘维娟,程谓,张朔. 云临高速桥改路基路堑边坡与填方路堤稳定性评价[J]. *水利与建筑工程学报*, 2021, 19(4): 125-130, 143.

[11] 曹琪. 路基填筑对邻近桥梁桩基影响的数值模拟分析[J]. *交通世界*, 2021(7): 100-101, 117.

[12] 梁荣康,张庆军,张成,等. 前海软土蠕变特性试验及模型参数研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(S2): 133-136.

[13] 杨玲,张帆,杨宾川. 车辆荷载作用下城市低填路基结构力学性能分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(13): 73-76, 85.

[14] 赵迪,王俊杰,黄诗渊. 陆域堆载对框架码头桩基弯矩影响的试验研究[J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(5): 32-36.

[15] 曹文昭,杨志银,蔡巧灵,等. 软土地基超长桩静载试验中桩侧堆载影响分析[J]. *建筑科学与工程学报*, 2021, 38(6): 1-10.

[16] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG 3362—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.