

文章编号:1673-0062(2016)03-0103-07

塑料排水板堆载预压处理软土地基对 临近桥梁桩基的影响研究

冯胜洋,李向阳,叶勇军,蒋复量,王淑云,陈 祉

(南华大学 环境保护与安全工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘要:对某软土地基的塑料排水板堆载预压进行了桩基沉降和地基土孔隙水压力监测,使用 ABAQUS 有限元分析软件建立了三维有限元分析模型,现场实测数据结合有限元模型分析结果,系统研究了塑料排水板堆载预压处理软土地基对临近桩基的影响,研究表明:堆载预压初期孔隙水压力急剧增加,前期孔隙水压力消散较快,后期逐渐减小;临近桩基的变形主要以水平变形为主,竖向位移较小,随着孔隙水压力的消散,桩身水平位移随时间逐渐减小;堆载预压对临近桩基的不利影响主要发生在堆载预压初期,该阶段桩侧被动土压力和桩身弯矩均最大,且都位于桩顶处,随着孔隙水压力的消散,桩侧被动土压力和桩身弯矩都随时间逐渐减小;桩身最大水平位移和最大弯矩都随堆载预压距离的增加而急剧减小,因此在桩基附近进行塑料排水板堆载预压处理软土地基时,应保持合适的堆载预压距离。

关键词:软土地基;塑料排水板堆载预压;临近桥梁桩基;有限元分析

中图分类号:TU471.8 **文献标识码:**B

Studies on the Influence of PVD Improved Soft Soil on the Adjacent Bridge Piles

FENG Sheng-yang, LI Xiang-yang, YE Yong-jun, JIANG Fu-liang,
WANG Shu-yun, CHEN Zhi

(School of Environmental Protection and Safety Engineering, University of South China,
Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: In-suit measurement of the settlement and the pore water pressure of soft soil ground was carried out for a prefabricated vertical drain (PVD) improved soft soil ground.

收稿日期:2016-03-22

基金项目:湖南省教育厅科学研究基金资助项目(15C1191);南华大学博士科研启动基金资助项目(2014XQD11);
衡阳市科学技术发展计划基金资助项目(2015KS06)

作者简介:冯胜洋(1985-),男,湖北孝感人,南华大学环境保护与安全工程学院讲师,博士.主要研究方向:建筑安全.

A 3D finite element analysis model of PVD improved soft soil ground was established by the ABAQUS. Comparison of the numerical simulation and the in-suit measurement was used to study the influence of PVD improved soft soil ground on the adjacent bridge piles. Research results indicate that the pore water pressure increases rapidly at the preliminary stage, and dissipates faster at the early stage than the later stage; the horizontal displacement is main for the adjacent piles, while the vertical displacement is very small, and the horizontal displacement decreases gradually with the pore water pressure dissipating; The negative influence of PVD improving soft soil ground on the adjacent piles mainly occurs at the preliminary stage when the passive earth pressure and the bending moment of pile are the maximum at the pile top, and decreasing gradually with the pore water pressure dissipating; The passive earth pressure and the bending moment of piles are decreasing sharply with the distance between the PVD area and the adjacent piles, so it is supposed to keep suitable distance when using the PVD method.

key words: soft soil foundation; PVD; adjacent bridge piles; finite element analysis

软土地基具有高压缩性、承载力低、固结过程缓慢等问题,其承载力和稳定性往往不能满足工程要求,有时甚至无法直接进行施工.如果不对软土地基进行处理,在荷载作用下会产生较大的工后沉降和不均匀沉降,对建筑物(构筑物)安全产生极大的危害^[1-3].塑料排水板堆载预压能极大地加快软土地基的固结排水进程,能有效地增大软土地基的承载能力^[4-5].近十几年来,该方法已经在我国的城市化建设中得到了广泛应用.但是由于塑料排水板堆载预压会使软土地基在极短的时间内完成绝大部分固结变形,从而迅速打破临近桩基的桩—土应力平衡,引起临近桩基出现工后变形,甚至破坏.很显然,塑料排水板堆载预压处理软土地基会对临近桩基造成不利影响,如若处理不当将会严重危害上部结构安全.然而由于塑料排水板堆载预压处理软土地基对临近桩基的影响机理尚不够清晰,国内外相关研究非常匮乏,理论研究远远落后于工程实践需要.

鉴于此,本文对某软土地基的塑料排水板堆载预压现场进行了桩基沉降和地基土孔隙水压力监测,使用 ABAQUS 有限元分析软件建立了三维有限元分析模型,现场实测数据结合有限元模型分析结果,系统研究了塑料排水板堆载预压对临近桩基的作用机理,为类似工程的开展提供参考.

1 现场实测与有限元模拟分析

采用塑料排水板堆载预压软基处理方案关键要确定合理的预压荷载.由于目前饱和土固结机理研究的不完善,堆载预压仍然没有成熟的理论和设计计算方法,现有的设计计算方法基本上都

是经验性或半经验性的,至今尚未形成一套完整的设计计算理论^[6].近年来,随着大型有限元通用分析软件的逐步完善和计算机技术的快速发展,有限元分析方法已经被越来越广泛的应用于岩土工程领域,解决复杂的岩土工程工程问题^[7-8].

1.1 现场实测

在塑料排水板堆载预压处理软土地基过程中,同时对软土地基处理区域的沉降和孔隙水压力、临近桩基的变形进行了同步监测,监测元器件埋设位置见图 1.其中,孔隙水压力监测点位于 T1、T2 监测点下 -8 m 淤泥层中,采用 XS-186 型孔隙水压力计测量.T1、T2 监测点和桥梁桩基两角点(T3、T4 监测点)设置沉降和变形监测点,使用高精度全站仪进行沉降监测.

1.2 塑料排水板的有限元模拟

目前塑料排水板地基固结常规处理方法都是将其简化为平面应变或单井轴对称分析.单井轴对称分析仅能考虑一根砂井的作用,无法得到地基的横向变形以及荷载作用范围的影响.平面应变有限元法计算中则考虑到排水板地基的三维特征,常常需要根据轴对称单井与平面应变砂墙之间的固结度相等原则进行等效变换,将排水板地基转换为排水板墙进行平面应变计算.经过等效转换后,地基各点的几何位置已经不能和原型一一对应,因此对于本文这类复杂的工程问题来说,该方法显然是不适用.比较理想的做法是采用三维有限元方法进行计算,但若将塑料排水板视为实体单元进行划分,对于本文来说计算规模将是非常庞大.因此,文中塑料排水板使用文献[9]中建立的排水板单元进行模拟,该单元为一维 2 节点线单元,视为弹性体.

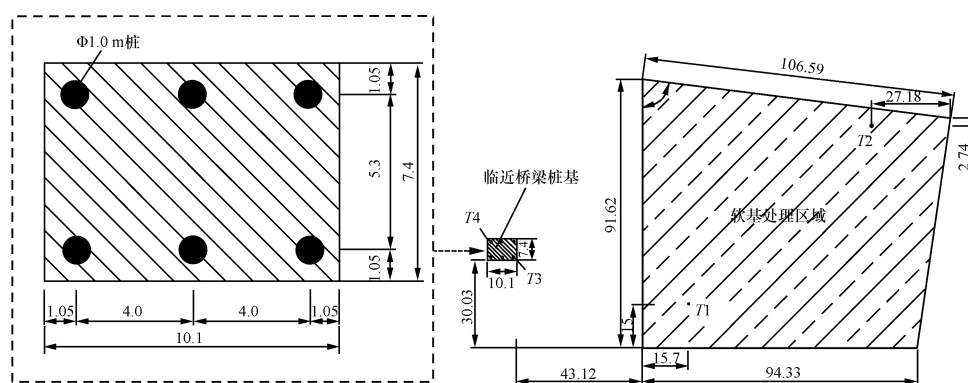


图 1 现场监测点(单位:m)

Fig.1 Monitoring stations

1.3 有限元计算模型的建立

塑料排水板打穿淤泥质土并进入其下卧中砂层 0.5 m,打设深度为 16 m.临近桥梁桩基由 3×2 根 Φ1.0 m 的混凝土灌注桩组成,桩长 32 m,纵向桩间距 4 m,横向桩间距 5.3 m,承台厚度 1.5 m.使用 ABAQUS 建立塑料排水板堆载预压处理软土地基及临近桩基的三维有限元分析模型,如图 2

所示.模型横、纵、竖向分别为 400 m、200 m、96 m.地基软土使用渗流—应力耦合模型,其中应力~应变模型为摩尔—库伦模型,各土层的材料参数如表 1 所示.塑料排水板面积 0.007 m²,排水板弹性模量为 1.5 GPa,渗透系数为 1×10⁻² m/s,塑料排水板间距为 1 m.塑料排水板单元适用文献[9]中开发的排水板 UEL 子程序.

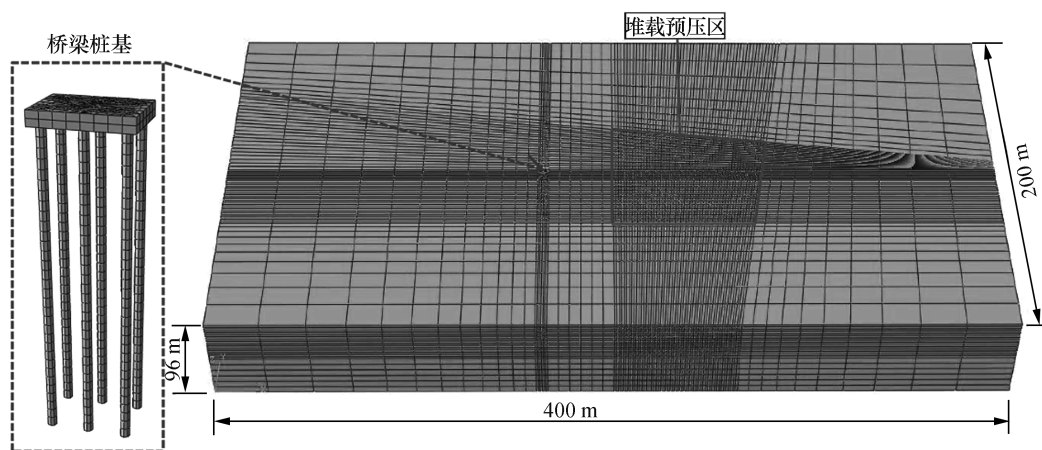


图 2 堆载预压有限元计算模型

Fig.2 The FEM model of preloading

表 1 地基各土层材料参数

Table 1 The soil physical mechanics parameter

	厚度 h/m	密度 ρ/(g·cm ⁻³)	杨氏模量 E/MPa	渗透系数 K _v /(cm·s ⁻¹)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	孔隙比 e
素填土层	2.4	1.8	6.2	6e-5	14.2	15.8	0.82
淤泥	13.1	1.68	3.7	1.54e-6	8.4	6	1.03
中砂	2.2	1.95	36.2	6e-4	0.1	21.4	0.72
粉砂、细砂	5.7	1.8	22.1	3.4e-4	0.1	12.9	0.68
粉质黏土、淤泥质黏土	4.3	1.75	7.8	1.3e-5	12.4	7.8	0.92
中砂、粗砂	5.4	1.9	61.8	7.8e-4	0.1	23.7	0.66

桩—土接触面和承台—土接触面上设置接触单元,其中桩侧接触面使用库伦摩擦模型,桩底与桩底土体、承台与承台底土体接触面均使用无摩擦硬接触模型^[10].桩侧接触面摩擦系数 $\mu = \tan 0.75\phi$, ϕ 为接触土体的内摩擦角.地基土使用八结点六面体孔隙压力单元(C3D8P),桩和承台使用八结点六面体单元(C3D8).模型侧面约束水平向位移,底面约束竖向位移,顶面设置为排水边界.

地基土应力平衡使用 geostatic 分析步,具体平衡方法见文献[11],地应力平衡后地基土竖向位移达到 10^{-9} 数量级,对后续模拟计算的影响可忽略不计.

堆载土高度为 2 m,堆载土的重度为 20 kN/m^3 ,荷载均布应力为 40 kPa ,堆载预压时间为 56 d.桥梁桩基承受总荷载为 $13\,287 \text{ kN}$.

2 有限元计算结果及分析

2.1 有限元模拟结果与实测值的对比

软土地基 T1、T2 监测点下-8 m 淤泥层中孔隙水压力随时间的变化关系如图 3 所示.由图 3 可知,T1、T2 监测点下-8 m 淤泥层中孔隙水压力有限元数值模拟计算值与实测值较为接近,T1 点下-8 m 淤泥层中孔隙水压力有限元数值模拟计算值与实测值最大相差不超过 7.8%,T2 点最大相差不超过 9.2%;两者发展趋势也非常接近:堆载预压初期(0 d~0.5 d)孔隙水压力快速增大,之后孔隙水压力随时间而减小,前期(0.6 d~12 d)孔隙水压力消散较快,后期逐渐减小.

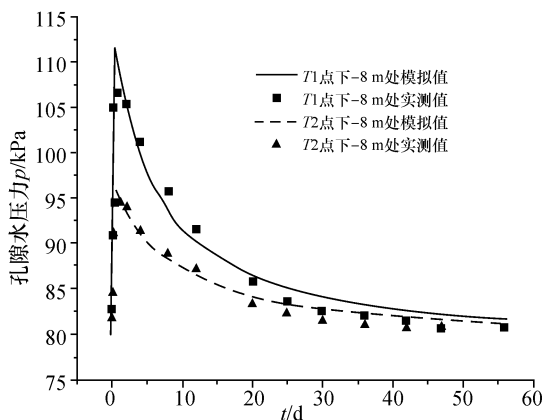


图 3 地基土中孔隙水压力随时间的变化关系图

Fig.3 The pore water pressure of soils changing with time

软土地基 T1、T2 监测点竖向位移随时间的变化关系如图 4 所示.由图 4 可知,T1、T2 监测点

竖向位移有限元数值模拟计算值与实测值较为接近,T1 点竖向位移有限元模拟值与实测值最大相差不超过 10.3%,T2 点最大相差不超过 8.9%,两者发展趋势也基本一致.

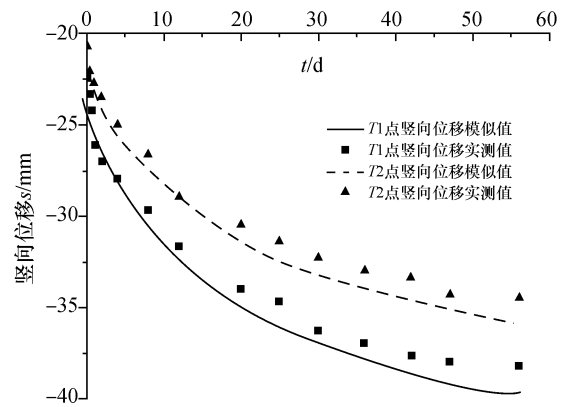


图 4 地基土竖向位移随时间的变化关系图

Fig.4 The vertical displacement of soils changing with time

临近桩基承台角点 T3、T4 的竖向和水平位移随时间的变化关系分别如图 5、图 6 所示.由图 5 可知,在软土地基的堆载预压影响下,临近桩基承台角点竖向位移较小,模拟值与实测值相差较小;在堆载预压初期,软土挤压临近桩基使承台出现微小隆起,随着孔隙水压力的消散,承台恢复初始位置并随时间逐渐向下沉降.由图 6 可知,临近桩基承台的角点水平位移模拟值与实测值较为接近,T3 点最大相差不超过 9.9%,T4 点最大相差不超过 11.2%;受堆载预压影响,临近桩基承台出现了较大的水平位移(背向堆载方向),堆载初期最大达到 18.5 mm ,随着孔隙水压力的消散,承台水平位移随时间逐渐减小,趋向于 9.3 mm .

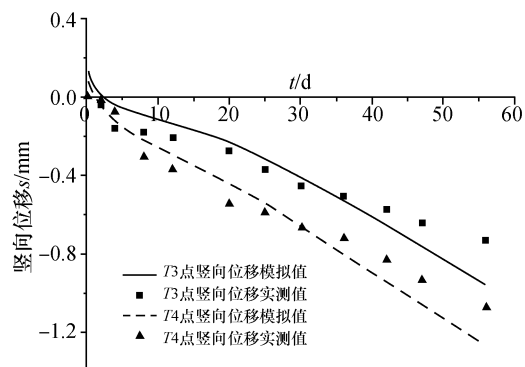


图 5 承台角点竖向位移随时间的变化关系

Fig.5 The vertical displacement of cushion cap changing with time

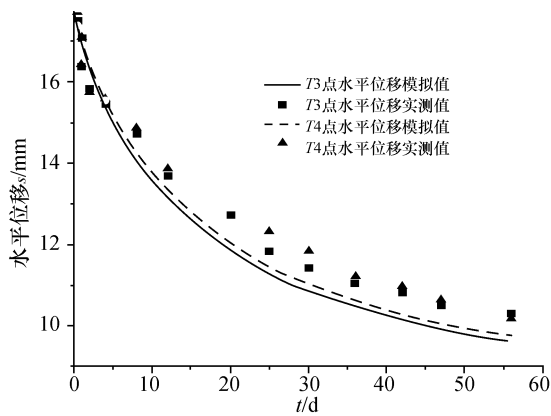


图 6 承台角点水平位移随时间的变化关系
 Fig.6 The horizontal displacement of cushion cap changing with time

由以上实测数据与有限元对比分析结果可知,文中建立的三维有限元分析模型能较精确地模拟塑料排水板堆载预压对临近桩基的影响.

2.2 堆载预压对临近桩基的影响

2.2.1 堆载预压对临近桩基变形的影响

软土地基堆载预压 56 d 后临近桩基水平位移矢量图如图 7 所示.由图 7 可以看出,在堆载预压作用下软土出现水平移动,临近桩基承受由此产生的被动荷载,桩身朝背向堆载预压一侧移动,桩身水平位移沿深度增加而增大,最大水平位移位于桩底处.

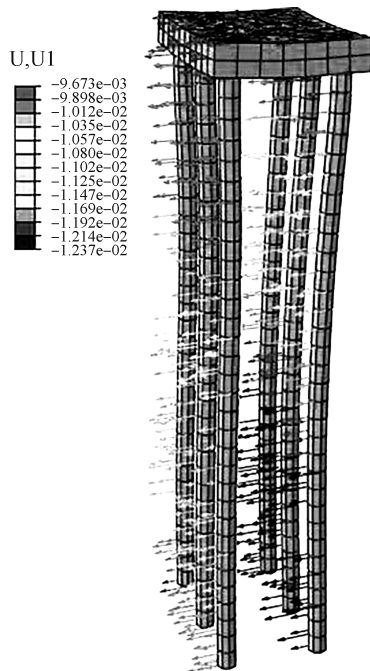


图 7 预压 56 d 后桩基水平位移矢量
 Fig.7 The vectorgraph of piles horizontal displacement preloading after 56 d

不同堆载预压时间桩身水平位移沿深度的分布曲线如图 8 所示.由图 8 可知,随着地基土孔隙水压力的消散,桩身水平位移随时间而减小;堆载预压初期(0~0.6 d)桩身水平位移沿深度减小,而随着地基土孔隙水压力的消散,堆载预压后期(20 d~56 d)桩身水平位移沿深度增大,其中 56 d 增大幅度最为明显,这是由于随着堆载预压时间的增加,地基土深层孔隙水逐渐随着塑料排水板排出,深层地基土有效应力逐渐增大,进而桩侧被动土压力增大,从而使桩身下部水平位移越来越大.

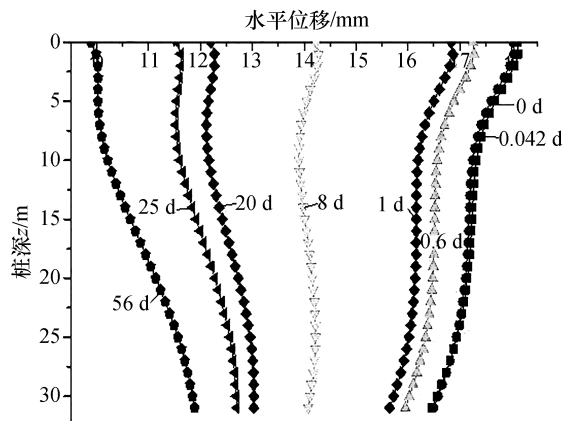


图 8 桩身水平位移沿深度的分布曲线
 Fig.8 The distribution curve of pile horizontal displacement along the depth

2.2.2 堆载预压对临近桩基内力的影响

不同堆载预压时间桩侧被动土压力沿深度的分布曲线如图 9 所示(被动土压力负值表示背离堆载预压方向,正值表示指向堆载预压方向).由图 9 可知,被动土压力大致可以分为两个部分:桩身上部的负被动土压力和桩身下部的正被动土压力,即桩身上部被动土压力背离堆载预压方向,而桩身下部被动土压力指向堆载预压方向.随着堆载预压时间的增加,被动土压力逐渐减小,背离堆载预压方向的被动土压力逐渐下移,指向堆载预压方向的最大被动土压力向桩身下部发展,且随时间逐渐减小.这表明随着孔隙水压力的消散,被动土压力沿桩身的分布逐渐趋于平缓,因此,堆载预压对临近桩基的不利影响主要发生在堆载预压初期,该阶段桩侧被动土压力最大.

不同堆载预压时间桩身弯矩沿深度的分布曲线如图 10 所示.由图 10 可知,桩身最大弯矩位于桩顶与承台接口处,堆载预压 0 d 时弯矩最大,达

到 $247.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$; 随着孔隙水压力的消散, 桩身弯矩逐渐减小, 56 d 后桩身最大弯矩减小为 $190.9 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

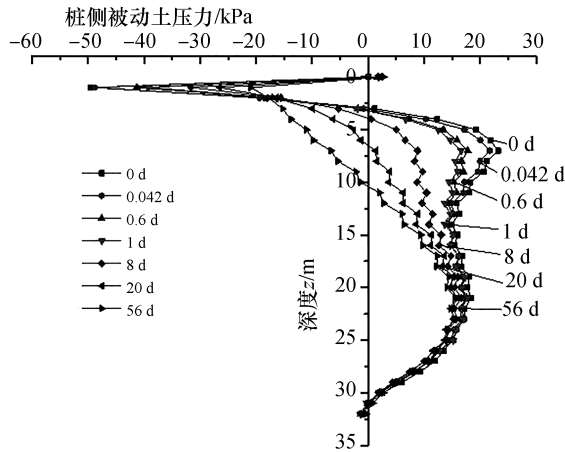


图9 桩侧被动土压力沿深度的分布曲线

Fig.9 The distribution curve of pile passive earth pressure along the depth

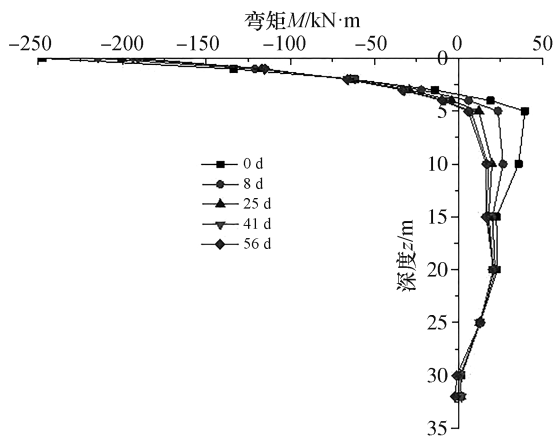


图10 桩身弯矩沿深度的分布曲线

Fig.10 The distribution curve of pile moment along the depth

2.2.3 堆载预压距离对临近桩基的影响

堆载预压区域距临近桩基的距离分别取 $3B$ 、 $4B$ 、 $5.8B$ 、 $10B$ 、 $15B$ (B 为临近桩基宽度, $B=7.4 \text{ m}$, $5.8B$ 为实际距离), 经过 56 d 堆载预压后, 桩身最大水平位移与堆载预压区域距桩基距离的关系如图 11 所示, 桩身最大弯矩与堆载预压区域距桩基的距离的关系如图 12 所示. 由图 11、图 12 可知, 桩身最大水平位移和最大弯矩都随堆载预压距离的增加而急剧减小, $3B$ 时桩身最大水平位移达到 29.28 mm , 最大弯矩达到 $592 \text{ kN} \cdot \text{m}$ (桩顶与承台接口处), 此距离软土地基堆载预压将会对临近

桩基造成极大的危害; 而当堆载预压区域距桩基的距离达到 $15B$ 时, 桩身最大水平位移仅为 0.58 mm , 最大弯矩为 $13.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 此距离堆载预压对桩基的影响基本可以忽略。

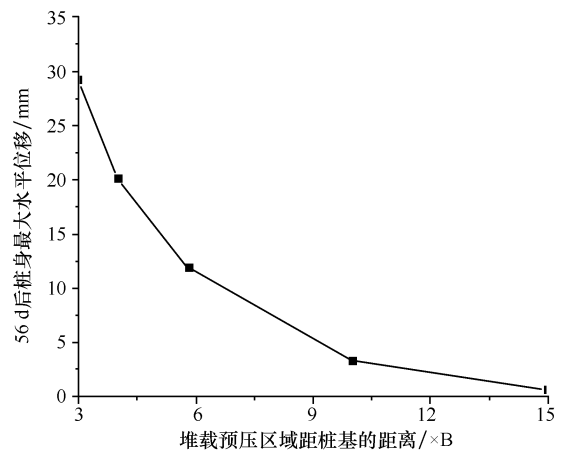


图11 桩身最大水平位移与堆载预压区域距离的关系

Fig.11 The relation between the maximum pile horizontal displacement and preloading distance

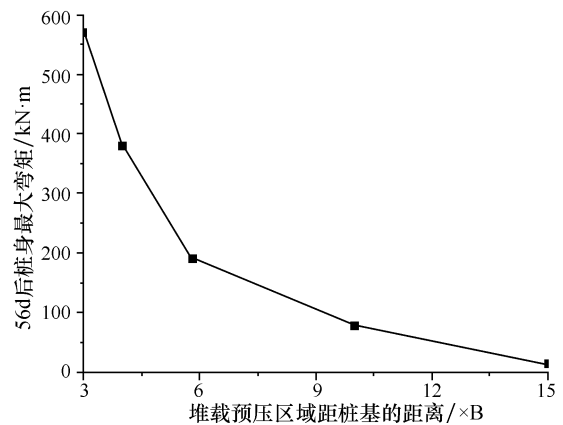


图12 桩身最大弯矩与堆载预压区域距离的关系

Fig.12 The relation between the maximum pile moment and preloading distance

3 结论

使用 ABAQUS 有限元分析软件建立了某软土地基的塑料排水板堆载预压处理的三维数值分析模型, 通过现场的沉降和孔隙水压力监测数据验证有限元分析模型, 研究塑料排水板堆载预压处理软土地基对临近桩基变形和内力的影响, 结论如下:

- 1) 建立的三维有限元分析模型能较精确地模拟塑料排水板堆载预压对临近桩基的影响;
- 2) 堆载预压初期孔隙水压力急剧增加, 之后

孔隙水压力随时间而减小,前期孔隙水压力消散较快,后期逐渐减小;

3)在堆载预压影响下,临近桩基的变形主要以水平变形为主,竖向位移较小,随着孔隙水压力的消散,桩身水平位移随时间逐渐减小;

4)堆载预压对临近桩基的不利影响主要发生在堆载预压初期,该阶段桩侧被动土压力和桩身弯矩均最大,且都位于桩顶处,随着孔隙水压力的消散,桩侧被动土压力和桩身弯矩都随时间逐渐减小;

5)桩身最大水平位移和最大弯矩都随堆载预压距离的增加而急剧减小,因此在桩基附近进行塑料排水板堆载预压处理软土地基时,为保证桩基的服役安全,应保持合适的堆载预压距离.该安全距离应根据现场实际情况进行综合评估,相关评估方法有待进一步研究.

参考文献:

- [1] Cui Z D, Yang J Q, Yuan L. Land subsidence caused by the interaction of high-rise buildings in soft soil areas [J]. *Natural Hazards*, 2015, 79(2): 1199-1217.
- [2] 张季超, 曾华健, 童华炜, 等. 广东科学中心饱和淤泥质砂土地基预处理技术的研究与应用[J]. *广州大学学报: 自然科学版*, 2007, 6(3): 62-67.
- [3] Cui Z D, Jia Y J. Study on the mechanisms of the soil consolidation and land subsidence caused by the high-rise building group in the soft soil area [J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 604-608.
- [4] 叶观宝. 地基处理与托换技术[M]. 3版. 北京: 建筑工业出版社, 2005.
- [5] Voottipruex P, Bergado D T, Lam L G, et al. Back-analyses of flow parameters of PVD improved soft Bangkok clay with and without vacuum preloading from settlement data and numerical simulations [J]. *Geotextiles & Geomembranes*, 2014, 42(5): 457-467.
- [6] 肖策, 褚丝绪, 姜云龙, 等. 塑料排水板堆载预压法在软基处理中的应用[J]. *施工技术*, 2012, 41(1): 64-68.
- [7] 沈建东. 塑料排水板堆载预压法处理软土地基的工后沉降控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [8] Chai J, Bergado D T, Shen S L. Modelling prefabricated vertical drain improved ground in plane strain analysis [J]. *Proceedings of the ICE-Ground Improvement*, 2013, 166(2): 65-77.
- [9] 费康, 张建伟. ABAQUS在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [10] 魏丽敏, 冯胜洋, 何群, 等. 改进Koppejan蠕变模型及其应用[J]. *岩土力学*, 2014, 35(6): 1762-1767.
- [11] 冯胜洋. 深厚软土区段高速铁路桥梁桩基工后沉降特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.