

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.12.011

软基堆载对邻近桥桩作用的数值分析

彭龙仕, 庞林祥

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于研究软基堆载对邻近桥桩性状的复杂作用以及探讨对应软土地基加固方法的原因, 采用有限元分析软件 PLAXIS8.2 对广深沿江高速公路深圳段海滨大道后施工堆载对邻近沿江高速桥桩性状的影响进行研究。通过对软基土层、堆载位置、堆载大小对邻近桥桩性状的影响, 以及对两种软土地基加固方法效果进行比较分析, 研究结果显示软基土层的塑性破坏是引起邻近桥桩应力和应变的根本原因, 堆载距离相比堆载大小对邻近桥桩的性状影响更为明显。另一方面, 对该滨海大道软土地基, 采用水泥搅拌桩法(保证桩长、桩径)或强夯块石墩法(穿透亚黏土层)进行加固处理, 都能有效减小土体的侧向位移和土体的沉降, 减小对邻近桥桩的侧向作用, 从而使变形控制在允许范围内以及保障桥桩安全使用。

关键词: 桥梁工程; 软基堆载; 数值分析; 广深高速

中图分类号: U416.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)12-0067-06

Numerical Analysis of Adjacent Bridge Piles Influenced by Surcharge Loads on Soft Foundation

PENG Long-shi, PANG Lin-xiang

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to research the complex influence of surcharge load on soft soil on behavior of adjacent bridge piers and discuss the reinforcement methods for soft soil foundation, the FE analysis software Plaxis 8.2 is used to simulate the behavior of coastal expressway bridge piles influenced by the nearby surface loads in the post-construction of seaside avenue of Shenzhen section in Guangzhou-Shenzhen expressway. The influences of soft soil layer, location and weight of surcharge loads on the performance of the adjacent piles are compared, and the effects of 2 reinforcement ways of soft soil foundation are compared. The result shows that (1) the stress and strain of piles are caused by the plastic failure of soft soil layer, and the influence of surcharge load distance on the adjacent bridge piles is more obvious than the influence of surcharge load size; (2) for the coastal road, the lateral deformation of its soft foundation could be controlled in the allowable range to protect the safety service of the bridge piers through effectively reduce the lateral displacement and subsidence of the soil and reduce the side effect on adjacent bridge piers by using cement mixing pile method (guarantee pile's length and diameter) or tamping method (penetrate clay layer) for consolidation.

Key words: bridge engineering; surcharge load on soft foundation; numerical analysis; Guangzhou-Shenzhen expressway

0 引言

软基上的堆载引起土体侧向位移常常可达到堆

载高度的1%~2%。作用于邻近桥桩上的大水平位移, 将会使大尺寸桥桩产生变形甚至破坏。但因土体移动而产生的桩侧荷载很难确定, 从而使研究该

收稿日期: 2014-07-01

作者简介: 彭龙仕(1978-), 男, 湖南娄底人, 博士研究生。(palnsh@163.com)

类问题变得复杂。

Randolph^[1], Springman^[2]对被动桩性状利用二维有限元进行了分析。Ellis & Springman 则研究了桥墩与邻近桥桩及土壤体之间的相互作用^[3]。魏汝龙^[4]和王年香^[5]等则利用平面有限元法研究了高桩码头中桩土之间相互作用情况。Springman^[6], Branby & Springman^[7], Pan 等人^[8]研究的三维有限元分析结果表明其侧压力分布规律和桩体变形性状均与二维分析结果一致。同时魏汝龙等^[4]发现二维计算的最大沉降及最大水平位移的数值比三维有限元计算结果偏小约 10% 以下, 计算应力一致。故堆载对于邻近桥桩的作用分析可以简化为二维问题进行计算。

本文依托广深沿江高速公路深圳段海滨大道后施工建设实际, 对滨海大道后实施对沿江高速桥桩的影响进行有限元研究, 研究软土层、地基处理及荷载特性对邻近桥桩性状的影响。

1 问题简化与有限元建模

滨海大道属浅海区, 为海陆交界地带, 普遍分布淤泥, 厚度 0.5 ~ 0.8 m, 局部较厚达 6.6 m。桥桩长 42 m、桩径 1.8 m, 承台长 9.2 m、宽 7 m、高 3 m、高出地面 5.6 m, 横向桩间距 6.2 m, 纵向桩间距 4 m。堆载路堤顶面宽度 B 为 25 m, 堆载路堤堤趾到最近一根桩的距离 (堆载距离) L 为 3 m。

忽略桩间土体绕流因素影响而将桥桩等效为板桩, 则因受堆载作用的土层水平位移而产生的侧向作用力均施加于桩身。该模型结果使土层水平位移略小于实际值, 而桩身水平位移略大于实际值^[9]。但当桩中心距小于 3 倍桩径时 (该研究的工程实际满足要求), 被动桩将承担因堆载导致的土层水平位移在其附近产生的 90% 以上份额的侧向压力^[10], 因此可以进行等效。则板桩弹性模量为:

$$E = \frac{E_p d + E_s (u - d)}{u},$$

式中, E_p 为桥桩的弹性模量; E_s 为土体弹性模量; u 为相邻桩的中心距离; d 为桩径。

采用有限元 PLAXIS8.2 软件进行分析, 土壤体模拟为摩尔库仑理想弹塑性本构模型, 桥桩则模拟为线弹性梁结构单元, 通过对梁进行单元离散、对土进行三角形六单元离散实现桥桩与周围土层的相互作用。对于有限元模型的边界条件, 底部为固定边界, 左右为水平固定边界, 忽略桥桩的尺寸效应。

根据场地尺寸、地基参数 (见表 1, 天然地面标

高 -5.6 m) 及边界效应, 模型长度方向经试算取 220 m, 深度方向经试算取 60 m (微风化花岗岩层底面以下 20 m), 有限元计算模型见图 1。

滨海大道后实施, 计算过程中按每层 2 m 厚满铺模拟堆载, 由 -5.6 m 至路堤设计标高 +4.0 m。实际上, 海水面要以重度约为 25 kN/m³ 的材料进行填石处理, 考虑海水浮力, 浮重度为 15 kN/m³; 而堆载材料重度为 20 kN/m³; 出于安全考虑, 本文计算分析时不考虑浮力影响而采用 20 kN/m³。

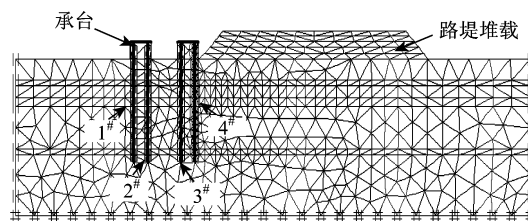


图 1 有限元计算模型

Fig. 1 FE Calculation model

表 1 计算参数表

Tab. 1 Calculation parameters

土层 编号	地层名称	层厚/ m	层底标 高/m	天然密度/ (g · cm ⁻³)	变形 模量/ MPa	泊松比	抗剪强度 (CU)	
							内摩擦 角 $\Phi/(^\circ)$	黏聚力 C/kPa
①	海湾淤泥		-13.15	1.48	1.67	0.3	10.3	8.3
②	亚黏土	2.80	-15.95	1.95	5.0	0.3	20	15
③	粗砂	3.10	-19.05	1.99	6.7	0.35	30	
④	全风化花岗岩	3.10	-22.15	2.10	89.88	0.37	35	160
⑤	强风化花岗岩	15.0	-37.15	2.20	118.5	0.37	39	690
⑥	弱风化花岗岩	1.10	-38.25	2.45	1 674	0.32	51	1 620
⑦	微风化花岗岩	2.90	-41.15	2.65	6 690	0.3	52	1 740

2 软土层对桥桩性状的影响

堆载完成时, 表层土体最大沉降约 1.3 ~ 1.4 m, 发生在堆载中心区域, 为水平位移的 3.5 倍, 堆载区域外的水平位移却大于沉降。土体最大侧移出现在堤趾处, 左侧由于桥桩的存在, 最大侧移小于右侧, 左侧邻桥侧土体最大侧移约 380 mm, 如图 2 所

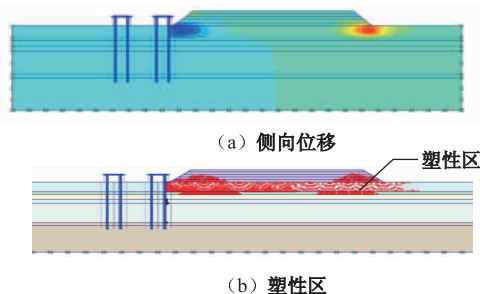


图 2 地基土位移及塑性区分布云图

Fig. 2 Nephograms of foundation soil displacement and plastic zone

示。同时,地基土塑性区分布显示上部淤泥层已大面积塑性破坏。

淤泥软土层的存在使各桥桩的水平变形(见图3)随着堆载高度的增加不断加大,桥桩桩身的附加侧移也逐渐增大。当荷载较小时,邻近桥桩的最大侧向位移发生在软土层中部。随着堆载的增大,桩身上部侧向位移也随之增大,且侧移向下部花岗岩发展;而土层的侧移则主要发生在上层软土。这主要是因为,在-20 m左右,地基土的泊松比较大,同时在该处地基土的变形模量也较大,易产生土拱效应^[10],因此,变形图在该位置突变。堆载达到设计标高后,3[#]和4[#]桥桩其最大附加位移达到80 mm以上,远大于其控制标准38 mm的限值,必将对大桥的结构安全带来危害。前排桩的遮拦效应使远离路堤的1[#]和2[#]桥桩附加侧向位移较小,随着堆载增加,变形增加较缓慢,堆载结束时,最大位移约为15 mm。

由于短桩现象^[11],堆载对群桩的变形影响,主要发生在邻近的桥桩之上。

桥桩均为嵌岩桩,土体位移引起的沉降均很小,可忽略不计,影响桥梁正常使用的主要是桥桩侧向位移。

堆载引起的附加弯矩(图4)显示,当堆载达到设计标高时,距离堆载较近的3[#],4[#]桥桩桩身产生1 800~2 000 kN·m的弯矩,而1[#],2[#]桥桩的最大弯矩约为3[#],4[#]桥桩最大弯矩的1/10,符合其变形特点。同时,土层在③和④交界面,压缩模量由6.7 MPa突变至89.88 MPa,突变幅度达到13倍以上,该处出现自大正弯矩,土层在⑥和⑦的交界面上也出现了最大正弯矩的突变。因此,最大正弯矩发生在软硬土层交界处,该结论与文献[12]结果一致。但对于相同的软硬土层,当与堆载的距离发生变化时,出现最大正弯矩的位置也会不同,这与桩长及桩土模量比有关。

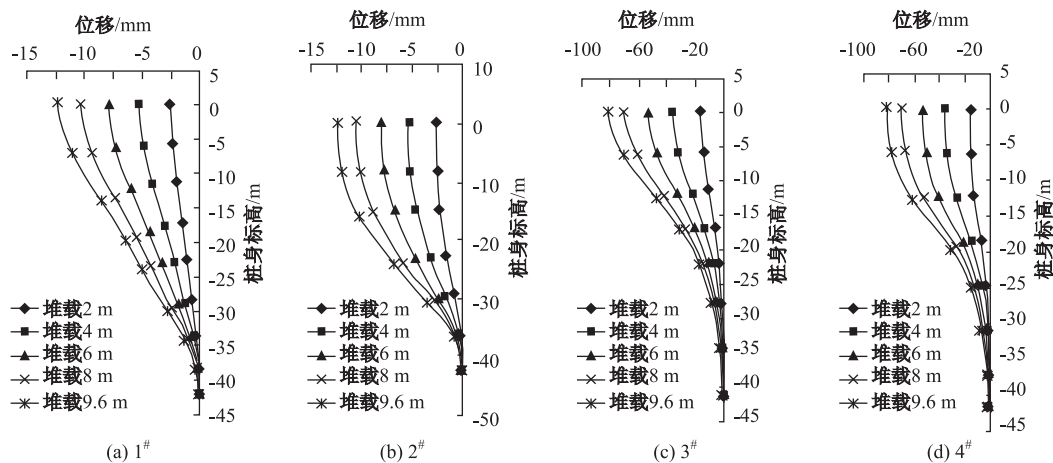


图3 侧向变形图

Fig. 3 Curves of lateral deformation

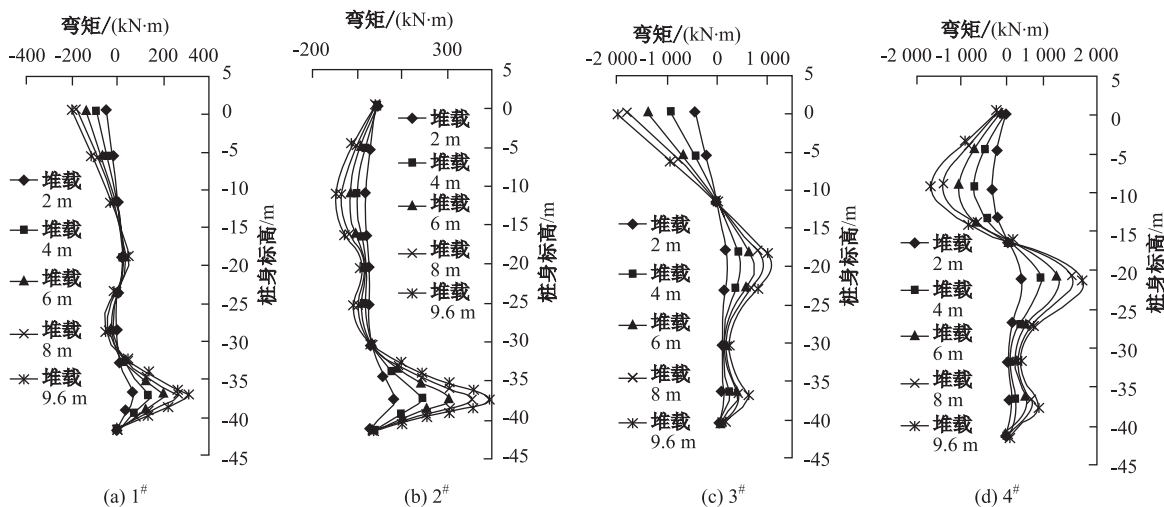


图4 侧向弯矩图

Fig. 4 Curves of lateral bending moment

1[#]和2[#]桥桩、3[#]和4[#]桥桩,各自之间由于承台的联结作用,双排桥桩发生协同变形。1[#]、3[#]桥桩的最大负弯矩在桩顶处,而2[#]、4[#]桥桩的最大负弯矩在最软土淤泥层的中部,该结果与文献[12]一致。

综上,由于场地土层土性太差,从而堆载对邻近的桥桩产生较大影响。当堆载作用于表层10.3 m左右的强度和抗变形能力都非常低的软土上时,地基土体将出现大范围的塑性滑移区,从而使地基发生过大的侧移和沉降。当变形和附加弯矩超过桥桩允许值,桥桩将会错动变位、承载力降低、严重时断裂破坏。而要达到控制因土体位移引起的附加弯矩和侧移这一目的,除保证一定的跨距外,有效方式是对地基进行加固,提高地基土体的抗变形能力和强度,减小因堆载引起的土体侧移,并避免地基土体中产生塑性破坏区域。

3 堆载位置及大小的影响

图5为桥桩和邻近堆载相对位置示意图。通过改变 B 和 L 来研究不同堆载宽度及堆载距离情况下桥桩的受力变形特性。

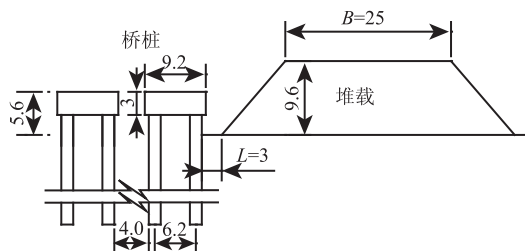


图5 堆载位置和桥桩位置示意图(单位:m)

Fig. 5 Schematic diagram of locations of surcharge load and bridge pier (unit:m)

图6为堆载距离和大小对与堆载最近的4[#]桥桩影响的计算结果。可以看出,堆载宽度为5 m时,对应的0, 10, 20 m和30 m堆载距离得到的最大水平位移分别为65.43, 36.63, 19.44 mm和9.88 mm;相应的堆载宽度为10 m, 20 m, 则其对应的不同堆载距离下的水平位移为72.07, 76.67, 40.06, 42.08, 21.5, 22.57, 10.95 mm和11.6 mm。由此可知,当堆载距离一定时,桥桩侧向位移随堆载宽度增大而增大;且堆载距离越小时,桥桩侧向位移随堆载宽度增大而增大的越显著。

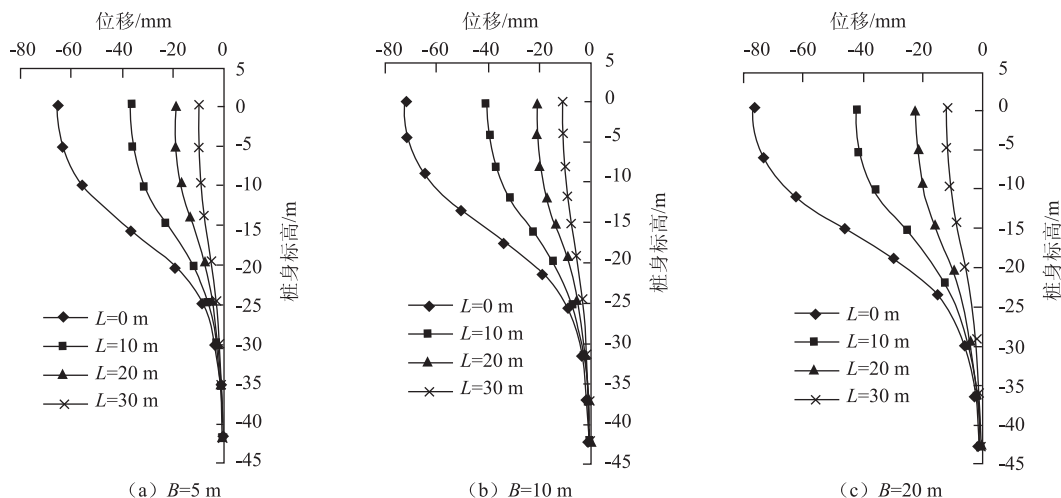


图6 堆载距离和大小对桥桩的影响

Fig. 6 Effect of surcharge load distance and size on bridge pier

对于一定的堆载宽度,桩身变形随堆载距离的增大而逐渐减小。如堆载宽度为20 m,当堆载距离为10 m时,桩身最大位移为42.1 mm;但当堆载距离增至30 m时,桩身最大位移减至11.6 mm,锐减达30 mm。由此可见,堆载距离对桥桩的变形影响非常显著,并随着堆载距离的增加,最大变形逐渐向桩顶移动,呈现短桩效应,与文献[11]研究结论一致。该结果也较好地解释了1[#]、2[#]桥桩相比于3[#]、4[#]号桥桩弯矩和变形都较小的原因。

随着堆载宽度的增大,邻近桥桩像短桩一样平行移动;而当堆载宽度达到一定的数值以后,堆载引起的土层应力大部分传向了深层地基,对邻近桥桩的影响反而减小。

4 地基处理的影响

为提高地基承载力和地基土体抗变形的能力,减小因堆载而作用在桩身的侧向推力,通常采取地基处理方式。比较常用的两种软土地基处理法是水

泥土搅拌桩法和强夯块石墩法。有限元分析通过两种途径实现:(1)直接在模型中建立搅拌桩模型;(2)通过置换换算得到加固地基土体的强度参数和等效模量,从而通过改变模型中部分土体参数来实现,本文采取第一种方法。

4.1 水泥土搅拌桩法处理

搅拌桩法形成的水泥土无侧限抗压强度在 $q_{cu} = 0.6 \sim 1.3 \text{ MPa}$ 之间,其黏聚力比天然土大 $10 \sim 20$ 倍,内摩擦角增大一倍左右,在提高软土地基强度的同时还显著降低土体沉降和侧移,从而降低土体侧移对邻近桥桩的侧向作用。

按 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 正方形布置水泥土搅拌桩,桩径 600 mm ,桩身穿透淤泥层和亚黏土层进入粗砂层长为 10 m 。图7为采用水泥土搅拌桩地基处理方法后,堆载到路堤设计标高时,4#桥桩的侧向变形图。图中 D 为水泥土搅拌桩桩径, C 为搅拌桩桩间距, E_0 为根据水泥掺入量确定的水泥土搅拌桩变形模量。分析显示,未加固时桥桩的最大侧向位移为 80 mm ,加固后最大侧向位移为 30 mm ,锐减 50 mm ,减小幅度达 62.5% 。可见,采用水泥搅拌桩加固地基后,桥桩侧向位移减小明显,地基加固效果显著。当其他条件一定时,桥桩侧向位移随水泥土搅拌桩变形模量增大而变小,如当桩径为 0.6 m ,桩间距为 3 m ,搅拌桩变形模量为 80 MPa 时,桥桩最大侧移为 33 mm ;而当变形模量为 160 MPa 时,最大侧移减小到 26 mm 。可见搅拌桩变形模量对计算结果影响较大,而其受水泥掺入量决定。同时搅拌桩变形模量的提高对桥桩变形的影响并不是无限制的,当其提高到一定量值后,影响将会逐渐减小。

取水泥土搅拌桩弹性模量为 $120, 160 \text{ MPa}$,进行分析,得4#桥桩的弯矩如图8所示。当水泥土搅拌桩压缩模量为 160 MPa 时,桩身最大附加弯矩为 $373 \text{ kN} \cdot \text{m}$,弯矩比未加固时明显减小(图4(d))。由此可见,采用合理的方法对软土地基进行加固处理,可以有效减小土体的侧向位移和土体的沉降,减小对邻近桥桩的侧向作用,从而使桥桩安全使用得到更大保障。

4.2 强夯块石墩法处理

块石墩墩径 D 为 1.5 m ,块石墩墩间距 C 为 4 m 。填石料为中风化角砾岩,变形模量 E_0 为 1.35 GPa ,重度 γ 为 24.77 kN/m^3 ,黏聚力 c 为 320 kPa ,摩擦角 ϕ 为 21.50° 。

图9(a)为块石墩墩底未穿透亚黏土层,填石料变形模量 E_0 由 1.35 GPa 变到 2.00 GPa 时,计算

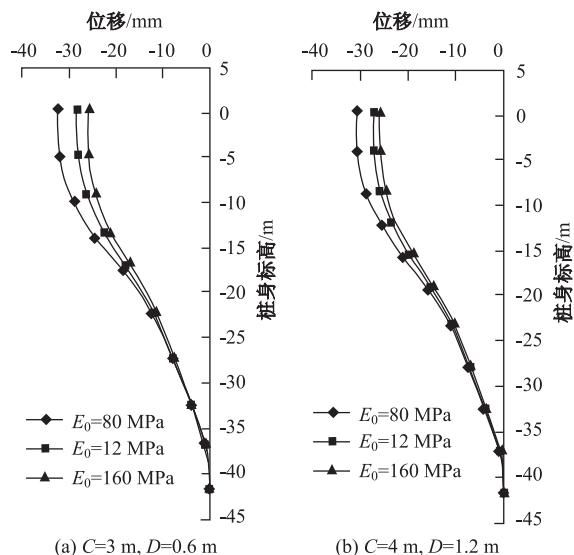


图7 4#桥桩水平位移图

Fig. 7 Curves of horizontal displacement of bridge pile No. 4

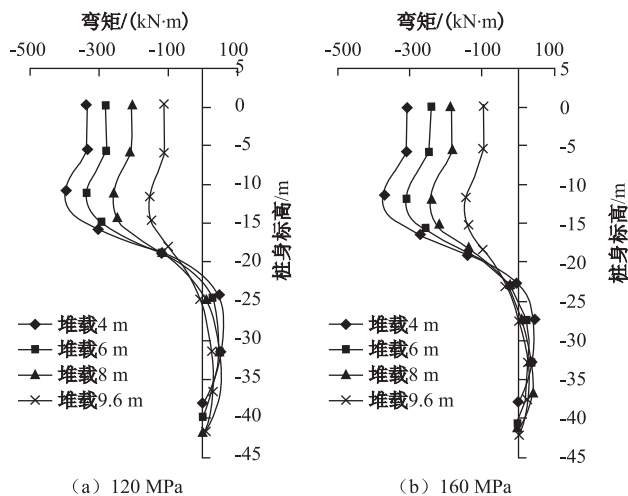


图8 4#桥桩弯矩图

Fig. 8 Curves of bending moment of bridge pile No. 4

得到的4#桥桩桩身侧向位移图。分析显示桥桩的侧向位移均在 35 mm 以上,表明块石墩墩底如果不穿透亚黏土层,则桩身侧向位移无法控制在允许的 30 mm 以内。因此,必须要用足够长度的块石墩来处理地基,否则块石墩体对软土侧向位移没有明显的遮拦作用^[13]。

当墩体穿透软土层,得到的桥桩侧移如图9(b)所示。可知,当块石墩身足够长时,可以很好地控制软土的侧向位移。但足够长的块石墩体,要求更高的施工技术和施工设备,同时墩体施工质量也更难控制。

通过增加石料的变形模量可以发现,对于碎石墩墩底是否穿透亚黏土软层,效果不明显。因为碎

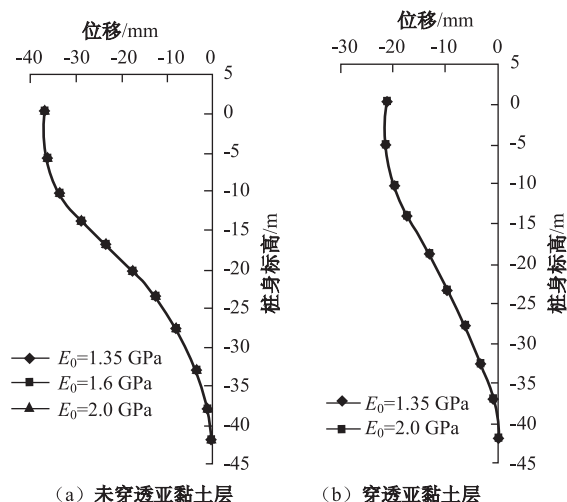


图9 块石墩加固方法对桥桩的影响

Fig. 9 Effect of tamping method on bridge pile

石桩的变形模量相对于软土而言已经非常之高 ($2 \text{ GPa}/5 \text{ MPa} = 400$), 只有当二者相差不大时, 进行桩土相对刚度的变化, 才能出现文献 [11] 的结论。

5 结论

(1) 软土堆载对邻近桥桩的影响主要是由于软土层发生了大面积的塑性破坏, 形成堤脚移动, 而引起桥桩产生位移和弯矩。

(2) 堆载大小和距离对邻近桥桩的影响, 具有短桩效应的特性, 但桥桩形状对于堆载距离更为敏感, 在工程应用中, 应首先保证堆载距离。

(3) 广深沿江高速公路深圳段海滨大道后施工, 其堆载作用引起的变形超出了邻近沿江高速桥桩的允许值, 通过采用水泥搅拌桩法 (保证桩长、桩径) 或强夯块石墩法 (穿透亚黏土层) 进行处理, 都能将变形控制在允许范围之内。

参考文献:

References:

- [1] RANDOLPH M F. The Response of Flexible Piles to Lateral Loading [J]. Geotechnique, 1981, 31 (2): 247-259.
- [2] SPRINGMAN S M. Lateral Loading on Piles due to Embankment Construction [D]. Cambridge: Cambridge University, 1984.
- [3] ELLIS E A, SPRINGMAN S M. Full-height Piled Bridge Abutments Constructed on Soft Clay [J]. Geotechnique,

2001, 51 (1): 3-14.

- [4] 魏汝龙, 王年香, 杨守华. 桩基码头与岸坡的相互作用 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14 (6): 38-49.
WEI Ru-long, WANG Nian-xiang, YANG Shou-hua. Interaction between Pile-supported Pier and Bank Slope [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14 (6): 38-49.
- [5] 王年香. 码头桩基与岸坡相互作用的数值模拟和简化计算方法研究 [D]. 南京: 南京水利科学研究院, 1998.
WANG Nian-xiang. Study of Numerical Simulation and Simplified Calculation Method for Interaction between Bridge Pier and Bank Slope [D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1998.
- [6] SPRINGMAN S M. Lateral Loading on Piles due to Simulated Embankment Construction [D]. Cambridge: Cambridge University, 1989.
- [7] BRANBY M F, SPRINGMAN S M. 3-D finite Element Modeling of Pile Groups Adjacent to Surcharge Loads [J]. Computer and Geotechnics, 1996, 19 (4): 301-324.
- [8] PAN J L, GOH A T C, WONG K S, et al. Three-dimensional Analysis of Single Pile Response to Lateral Soil Movements [J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26 (6): 747-758.
- [9] 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, 27 (11): 1286-1290.
CHEN Fu-quan, YANG Min. Numerical Analysis of Piles Influenced by Lateral Soil Movement due to Surcharge Loads [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27 (11): 1286-1290.
- [10] 张建勋, 陈福全, 简洪钰. 被动桩中土拱效应问题的数值分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (2): 174-179.
ZHANG Jian-xun, CHEN Fu-quan, JIAN Hong-yu. Numerical Analysis of Soil Arching Effects in Passive piles [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (2): 174-179.
- [11] CHEN C Y, MARTIN G R. Soil-structure Interaction for Landslide Stabilizing Piles [J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29 (5): 363-386.
- [12] STEWART D P. Lateral Loading of Piled Bridge Abutments due to Embankment Construction [D]. Nedlands: University of Western Australia, 1992.
- [13] POULOS H G, CHEN L T, HULL T S. Model Tests on Single Piles Subjected to Lateral Soil Movement [J]. Soil and Foundations, 1995, 35 (4): 85-92.