文章编号:1674-2974(2024)01-0024-09 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024003

软黏土基坑开挖诱发邻近桥梁桩基的时变响应

应宏伟[1,2],熊一帆[1†],吕唯[1],程康[3],刘广新[4],杜威[5]
(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心,浙江 杭州 310058;
3. 中铁十一局集团有限公司,湖北 武汉 430061;
4. 浙江省铁投建设工程有限公司,浙江 温州 325000;
5. 杭州铁路设计院有限责任公司,浙江 杭州 310004)

摘 要:利用PLAXIS 3D软件和软土蠕变模型,建立某市政道路下穿市域铁路桥梁基坑工程的三维数值模型,通过与实测数据的对比验证模型的合理性.将软土蠕变模型退化为软土模型,考虑桩顶约束条件,对比分析桥梁群桩的时效水平响应.结合两阶段法,将数值计算得到的土体自由场时变沉降作为“外荷载”作用于桩基,利用考虑桩土往返剪切的荷载传递方法,计算桩身自重、桩顶荷载和后续近接工程基坑开挖作用下桩基的竖向力学响应.结果表明:1)土体蠕变对邻近桥梁群桩变形、内力的影响较大,甚至不亚于墙体瞬时变形的影响;2)桥梁群桩桩身的变形、内力与离开坑壁的距离呈负相关,并表现出群桩的遮帘作用,桩顶的变形、内力则由桩顶约束条件决定;3)对于桩顶承受荷载不大以及后续受近接工程基坑开挖扰动不大的深厚软弱地层中的桥桩桩基,在以桩顶变形为控制目标时,存在合理桩径和合理桩长.

关键词:基坑开挖;桩基础;时效分析;荷载传递法
中图分类号:TU473 **文献标志码**:A

Time-dependent Response of Adjacent Bridge Pile Foundations Induced by Excavation in Soft Clay

YING Hongwei[1,2],XIONG Yifan[1†],LÜ Wei[1],CHENG Kang[3],LIU Guangxin[4],DU Wei[5]
(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3. China Railway 11th Bureau Group Co., Ltd., Wuhan 430061, China;
4. Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Wenzhou 325000, China;
5. Hangzhou Railway Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

Abstract: PLAXIS 3D software and soft soil creep model were used to establish a 3D numerical model of the

* **收稿日期**:2023-02-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678523), National Natural Science Foundation of China(51678523);中央高校基本科研业务费资助项目(B200201012), Fundamental Research Funds for the Central Universities (B200201012);浙江省建设科研项目(2018K119), Zhejiang Province Construction Research Project(2018K119)
作者简介:应宏伟(1971—),男,江西萍乡人,河海大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail:cxxyf0831@163.com

excavation of a municipal road underneath an elevated bridge. The rationality of the model was verified by comparing with the measured data. The soft soil creep model was simplified into the soft soil model, and the time-dependent horizontal response of the bridge pile group was compared, taking into account the constraint condition at the pile top. The two-stage method was used to incorporate the time-dependent settlement of the soil in the free field obtained through numerical calculation as the "external load" acting on the pile foundation. The load-transfer method, which accounts for the reciprocating shear between the pile and soil, was employed to calculate the vertical mechanical response of the pile foundation under the influence of self-weight, pile top load, and excavation of the adjacent foundation pit. The results indicate that: 1) Soil creep significantly impacts the deformation and internal force of adjacent bridge pile group, and its effect can be comparable to the influence of instantaneous deformation of the wall. 2) The deformation and internal force of bridge pile exhibit a negative correlation with the distance between the pile and the foundation pit, highlighting the curtain effect of pile group. The deformation and internal force at the pile top are governed by the constraint condition at the pile top. 3) Reasonable pile diameter and length exist for bridge pile foundations in deep soft strata where both the load on the pile top and disturbance from adjacent foundation pit excavation are minimal, when the deformation of the pile top is used as the control target.

Key words: excavation; pile foundations; time-dependent analysis; load-transfer method

在建、构筑物密集的地区开挖基坑将不可避免对邻近既有结构产生扰动,如房屋的沉降和不均匀沉降、隧道和地下管线的位移,严重时造成结构破坏.因此,准确预测基坑开挖诱发的邻近桥梁桩基变形具有重要的现实意义.

目前,研究基坑开挖对邻近桩基影响的方法大多为:1)理论解析法. Zhang 等[1-2]建立了考虑变形耦合效应、界面剪切滑移特性以及受荷历史的被动单、群桩分析方法,认为竖直方向上桩身遮拦效应明显,而在土体刚度较大时可不考虑水平方向上的遮拦效应;程康等[3]利用两阶段法,基于推导的考虑土体非等量径向移动的坑外土体水平位移场和修正后的 Pasternak 双参数地基基床反力系数,建立了基坑开挖下邻近既有单桩的变形控制方程;Liu 等[4]将基于 Mindlin 位移解的坑外土体自由场视为外荷载施加于邻近桩基,将桩基视为放置于 Vlazov 地基的 Timoshenko 梁,考虑桩身的剪切特性和成层土的影响. 2)模型试验法. Ong 等[5-6]基于一系列离心模型试验,详尽分析不同影响因素对临近软黏土基坑的单桩、群桩的影响;Ng 等[7-8]则利用离心机模型试验研究基坑开挖对邻近单桩、群桩和桩筏基础的影响,发现桩顶约束对桩身上部的附加弯矩影响显著,而对桩身下部附加弯矩的影响则相对有限. 3)数值模拟法. Liyanapathirana 等[9]基于所建三维数值模型展开参数研究,开发出一套估算桩基变形和内力的设计图表;Shakeel 等[10]详细分析开挖深度、桩长、群桩位置、支护体系刚度、土体渗透性和既有荷载等因素对桩基性状的影响,发现开挖结束后坑外超静负孔压的消散会诱发桩基长期的沉降;Shi 等[11]则利用数值软件对砂土基坑与摩擦桩的相互作用进行分析,认为若忽略开挖引起的桩侧和桩端摩阻力损失,桩基沉降将被低估高达 39%;Soomro 等[12]重点分析开挖深度 H_e 与桩基长度 L_p 比例关系对桩基性状的影响,发现随着 H_e/L_p 的增大,桩基沉降增大而侧移有所减小.

目前,"两阶段法"为理论研究的唯一方法,即先给出基坑开挖下桩基所在位置土体的自由位移场或应力场,再将其作为"外荷载"作用于桩基并计算力学响应.然而,囿于缺乏基坑开挖诱发坑外土体沉降的理论解,有关基坑开挖下邻近桩基竖向响应的理论研究停滞不前.此外,软黏土的变形和强度随时间发生明显变化的特性已在工程界达成共识,然而上述研究较少考虑基坑施工的时间效应,这将低估基坑开挖对周围环境如邻近桥梁桩基的影响.针对既有研究的不足,本文以深厚软黏土地基某下穿市域铁路桥梁的基坑工程为研究对象,利用 PLAXIS 3D 软件和软土蠕变模型建立三维数值模型,分析桥梁群桩的时效水平响应.结合两阶段法,将数值计算得

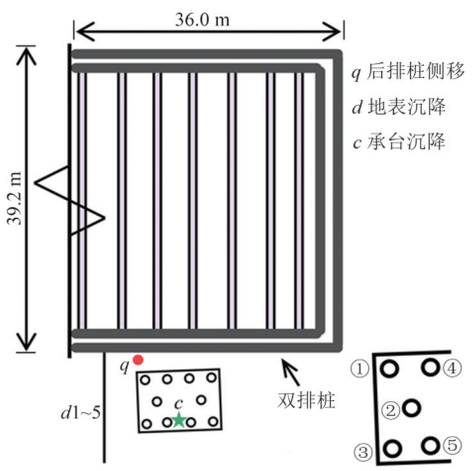
到的土体自由场时变沉降作为“外荷载”作用于桩基,利用考虑桩土往返剪切的荷载传递方法,计算桩身自重、桩顶荷载和后续近接工程基坑开挖作用下桩基的竖向力学响应.

1 模型建立与验证

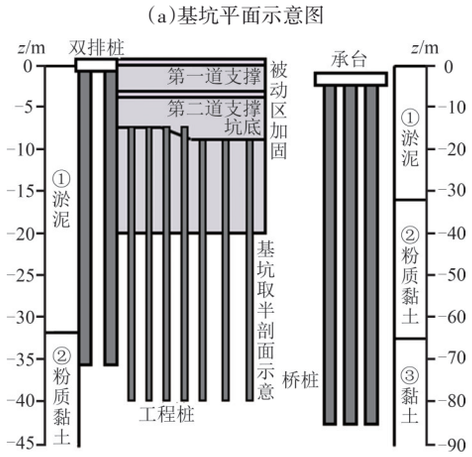
1.1 工程概况

温州某市政道路长线型基坑下穿市域铁路桥梁,桥梁正下方分坑如图1所示.自上而下的主要地层分别为①淤泥、②粉质黏土和③黏土;基坑开挖深度为8.6 m,平面尺寸约39.2 m×36.0 m,采用放坡形式与相邻基坑连通;围护结构采用直径1 m、排距2.5 m的双排桩结合两道支撑和被动区加固.限于篇幅,其他未见信息详见文献[13].

如图1所示,基坑旁侧为桥梁桩基,距基坑最小间距仅1.9 m,采用桩长约81 m、直径1.2 m的钻孔灌注桩,以③黏土为桩端持力层.



(a)基坑平面示意图



(b)基坑剖面示意图

图1 基坑示意图

Fig.1 Schematic diagrams of foundation pit

1.2 三维数值计算

采用PLAXIS 3D有限元软件,考虑对称性,将前述分坑的1/2作为三维数值分析的对象.为降低模型边界对计算精确性的影响,后排桩至水平边界的距离取大于5倍开挖深度,竖向边界取至桥桩桩底以下约10 m,模型尺寸为100 m×100 m×90 m.计算模型设置下边界位移约束,上边界位移自由,水平边界水平方向位移约束,竖直方向位移自由;设置每个开挖步中临为空面孔压为零的边界面.

计算分析时采用的土体参数如表1所示.虽然采用HS-Small土体模型能够得到较为合理的墙体变形及墙后土体变形,但无法模拟土体的蠕变和应力松弛等流变现象.传统的观点认为,基坑工程属于临时性工程,在如此短的时间内,主固结尚且没有结束,次固结更是无从谈起.但是众多工程实践[14-15]表明深厚淤泥地基中的基坑在较短的开挖暴露期间变形明显增长,表现出很强的蠕变行为,这说明在基坑工程中土体的次固结可能与主固结同时发生甚至更为明显.为了考虑软土基坑施工的时间效应,选取软土蠕变SSC模型作为①淤泥的本构模型;利用式(1)得到土体的修正压缩指数λ^*[16],修正回弹指数κ^*和修正蠕变指数μ^*则参考上海地区基坑分析的经验[17-18],取$\lambda^*/\kappa^*=10$、$\lambda^*/\mu^*=20$.②粉质黏土、③黏土和加固土则采用不考虑修正蠕变指数μ^*的软土SS模型.

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2.3(1+e)} \tag{1}$$

式中:C_c为压缩指数;e为孔隙比.

数值计算模型中的结构参数如表2所示,考虑坑底工程桩对基坑变形的积极作用[19],对坑底工程桩进行建模;桥桩的侧阻力定义为土层相关,最大值取68 kPa,端阻力的极限取276 kN,取值依据详见后文.考虑桥梁桩基与承台的施工和上部荷载的作用,数值计算的模拟工况如表3所示,将承台上部桥梁重量和市域列车行车荷载近似等效为5 500 kN的集中静荷载作用于承台顶部.网格划分如图2所示,生成84 244个单元、140 666个节点.

表1 土体计算参数

Tab.1 Soils calculation parameters

土层	γ/(kN/m^3)	c'/kPa	φ'/(°)	λ^*	κ^*	μ^*
①淤泥	16.2	1	20	0.09	0.009	0.004 5
②粉质黏土	18.8	25	27	0.05	0.005	
③黏土	18.3	29	28	0.07	0.007	
加固土	16.2	29	28	0.04	0.004	

注:γ为土体重度;c'、φ'为土体的有效强度指标.

表 2　结构计算参数

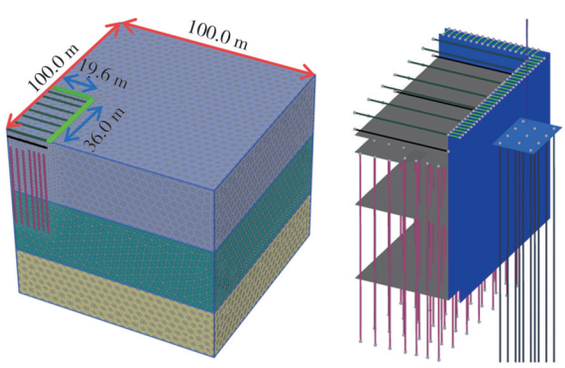
Tab.2　Structural calculation parameters

结构	弹性模量 E/GPa	尺寸
双排桩	30	2×0.79 m(等效)
连系梁	30	0.8 m×1.1 m
第一道钢筋混凝土支撑	30	1.2 m×1.2 m
第二道钢支撑	206	Φ609×16 mm
桥桩	30	直径 R=1.25 m
承台	30	厚度 d=2.5 m
工程桩	30	直径 R=0.8 m

表 3　模拟工况

Tab.3　Simulated stages

工况	施工内容	开挖时间 t/d
1	采用 K_0 法施加地应力	
2	激活桥桩	
3	作用 5 500 kN 集中荷载于承台	
4	激活双排桩、第一道支撑、工程桩,被动区加固	
5	开挖至-4.9 m	74
6	施工第二道支撑	
7	开挖至坑底	30



(a)全局视角　　(b)核心区

图 2　网格划分

Fig.2　Mesh division

1.3　模型验证

图 3 给出不同工况下基坑变形计算值与实测值的对比,其中 δ_h 为后排桩侧移,δ_v 为地表沉降.由图 3(a)可知,后排桩侧移计算值与实测值基本一致,但最大侧移所在深度大于实测值,这是因为本文案例利用墙后土体测斜表示后排桩侧移,而土体最大侧移所在深度随着与墙体距离的增大而减小[20-21].比较图 3(b)和表 4 可知,无论是地表沉降还是承台沉降 s_c,计算值与实测值都较为吻合.有限元得出的坑外沉降槽收敛相对缓慢,是因为软土蠕变模型不能考虑坑外远端土体的小应变特性,表明该模型在分析坑外较远处的地表沉降时仍有局限性.总体而言,基坑水平位移和地表沉降的计算值与实测值吻合较好,可以认为建立的三维数值模型比较合理.

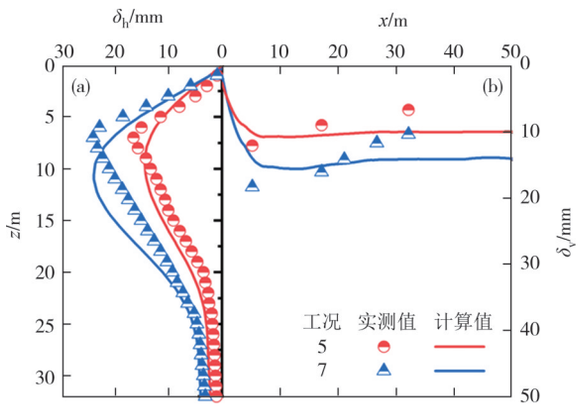


图 3　基坑变形对比

Fig.3　Comparison of excavation deformation

表 4　承台沉降对比

Tab.4　Comparison of cap settlement

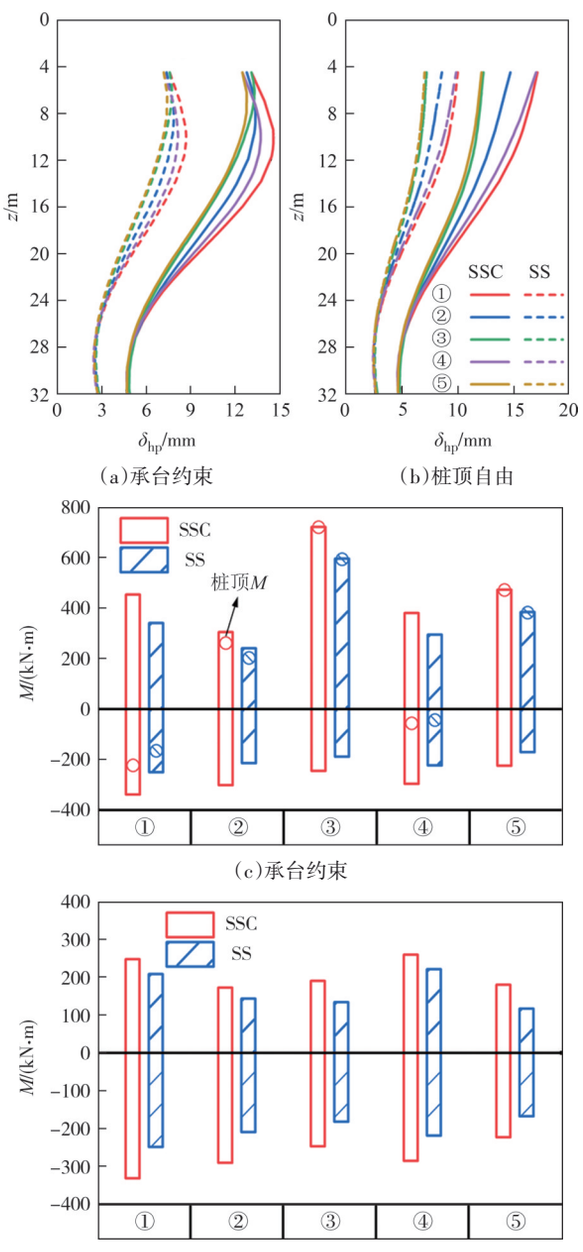
工况 7	实测值	计算值
承台沉降 s_c/mm	2.2	2.3

2　土体时变侧移下的桩基水平响应

数值计算中,引起邻近桥桩变形的因素包括基坑卸荷及其诱发的土体蠕变.为厘清土体蠕变对邻近桥梁群桩水平响应的影响,将 SSC 模型退化为 SS 模型,并考虑桩顶约束条件,分析桥梁群桩的时效响应,如图 4 所示.值得说明的是,SS 模型中的 λ^* 和 κ^* 分别对应 HS-Small 模型中的 E_{oed} 和 E_{ur}[16],但无法考虑土体的小应变刚度;SS 模型模拟的是理想的开挖条件,即开挖与架撑瞬时完成,不考虑土体蠕变的影响.

由图 4(a)(b)可知,土体蠕变不改变单桩之间的相对性状,但会显著影响群桩的整体侧移.这种影响的差异受施工时间的影响,由两部分组成.其一是蠕变引起围护墙的附加侧移从而诱发桥桩侧移;其二是蠕变诱发坑外桥桩产生不依赖于围护墙附加侧移的变形.比较非时效侧移和时效、非时效侧移的差值可知,对于深厚软黏土基坑来说,软土蠕变对坑外桥桩的影响甚至不亚于墙体瞬时变形,这说明在分析软黏土基坑时考虑蠕变效应是必要的.蠕变引起的邻近桥桩侧移在 10 m(围护桩最大侧移所在深度)以上部分十分显著,在 10 m 至 36 m(围护桩桩底深度)

则逐渐减小,这是因为10 m以上的土体受开挖扰动的影响较大.由图4(c)(d)可知,土体蠕变会增大桩身的正、负弯矩,且近端桩基受到的影响更加明显.



(a)承台约束 (b)桩顶自由

(c)承台约束

(d)桩顶自由

图4 桥桩侧移与弯矩对比

Fig.4 Comparison of lateral displacement and bending moment of bridge piles

桩身的变形和内力与单桩在群桩中的相对位置相关.近端桩桩身侧移和弯矩大于远端桩,角桩桩身侧移和弯矩大于中桩,这是因为近端桩所受土体运动的影响更大,角桩受遮帘作用的影响不如中桩.桩顶的变形和内力则受桩顶约束条件影响较大.关于承台约束情况,各桩桩顶弯矩并不为零,近端桩表现为负弯矩,图1(a)中的②号桩和远端桩表现为正弯矩.这是因为桩顶弯矩受单桩、承台相对位移的影响,开挖和蠕变引起的近端桩桩顶侧移大于承台侧移,承台侧移大于②号桩和远端桩的桩顶侧移,承台利用附加弯矩将近端桩向后拉,将②号桩和远端桩向前拽,这使得五根桩的桩顶侧移趋于一致,如图4(a)的实线曲线所示.对于自由桩顶情况,由图4(b)可知,当没有承台协调各桩桩顶之间的变形时,距坑壁越近,桩顶侧移越大.

3 土体时变沉降下的桩基竖向响应

PLAXIS 3D软件中的Embedded pile仅利用简单的弹性荷载传递方程模拟桩土相互作用,无法输入复杂的随深度变化的极限侧摩阻力,显然太过理想.因此,本文将数值计算得到的土体时效沉降作为“外荷载”作用于桥梁单桩,引入更合理的荷载传递方法,计算桩身自重、桩顶荷载和后续近接工程基坑开挖作用下桩基的竖向力学响应.

3.1 桩土相互作用

土体竖向位移场作用下的桩身沉降控制方程为:

$$\frac{\mathrm{d}^2\delta_\mathrm{p}}{\mathrm{d}z^2}-\frac{2\pi r_0\tau}{E_\mathrm{p}A_\mathrm{p}}-\frac{\gamma_\mathrm{p}}{E_\mathrm{p}}=0 \tag{2}$$

式中:δ_p为桩身沉降;r_0为桩基半径;τ为桩身任一深度处的侧摩阻力;E_p为桩体弹性模量;A_p为桩身横截面面积,γ_p为桩基重度.

对式(2)进行差分,得到任一节点i的差分方程:

$$\delta_\mathrm{p}^{i-1}-2\delta_\mathrm{p}^{i}+\delta_\mathrm{p}^{i+1}-\frac{2\pi r_0\tau_i}{E_\mathrm{p}A_\mathrm{p}}dl^2-\frac{\gamma_\mathrm{p}}{E_\mathrm{p}}dl^2=0 \tag{3}$$

式中:$dl=L_\mathrm{p}/n$,L_p为桩长,n为差分的单元数量.

考虑桩顶和桩端的边界条件,求解关于桩身位移的矩阵方程可得到桩顶加载和基坑开挖先后作用下的桩基沉降.考虑到荷载传递法应用的普遍性[2, 22-23],这里不详述有关桩身位移的求解过程.

对于受荷桩而言,其桩身荷载传递模型可以表示为如图5所示的多段直线[23],包括桩土关系的弹性、弹塑性、塑性阶段.

τ_max可以利用如下公式计算[2]:

$$\tau_\mathrm{max}=\frac{c+k_0\gamma z\tan\varphi}{R_\mathrm{f}} \tag{4}$$

式中:c、φ为土体的强度指标;k_0为土体的静止侧压力系数;γ为土体重度;R_f为土体的破坏比.

斜率S_1可以利用如下公式计算[2]:

$$S_1 = \tau_{max} r_0 \ln\left(r_m/r_0\right)/G \tag{5}$$

式中:G为土体的剪切模量;桩的有效影响半径r_m=$2.5L_p(1-v)$,v为土体的泊松比.

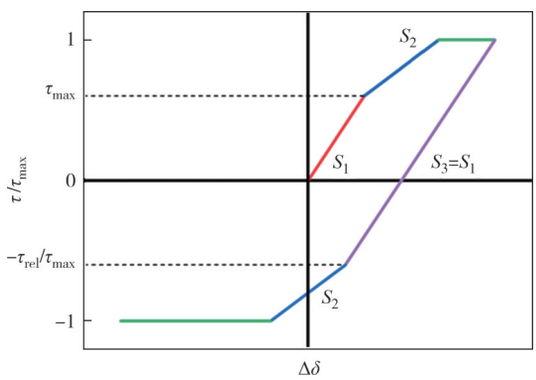


图 5　桩侧三直线荷载传递模型

Fig.5　Trilinear shaft mobilization model

桩端荷载传递模型如图 6 所示[23],考虑加荷段的方程为:

$$\frac{q_b}{q_{b-max}} = \left(\frac{\Delta\delta}{\Delta\delta^T}\right)^{\lambda} \tag{6}$$

式中:q_b为桩端反力;q_{b-max}为桩端反力的极限值;$\Delta\delta$为桩土相对位移标记为a;$\Delta\delta^T$为达到桩端反力极限值所需的桩土相对位移,取值可参考文献[24]. q_{b-max}的计算式为:

$$q_{b-max} = cN_c + \bar{p}N_q \tag{7}$$

式中:N_c、N_q为无量纲承载力系数,取值可参考文献[25];$\bar{p}$为桩端平面侧边的平均竖向压力.

$$\bar{p} = \frac{1+2k_0}{3}\gamma L_p \tag{8}$$

如图 6(b)所示,利用斜率R_b描述卸荷条件下桩端应力应变的变化,其中加荷段以λ=1 为例. 值得注意的是,当桩端土体沉降大于桩端沉降时,桩端反力可忽略不计.

3.2　算例分析

同为温州深厚软黏土地区的世贸大厦有着详实的试桩资料[26],结合文献[23],表 5 给出所需计算参数.

利用表 5 中的计算参数,考虑单桩重度的影响,图 7 给出图 1(a)中②号桩的荷载-沉降曲线,其中F为桩顶荷载,s_p为桩顶沉降,加载包括桩基在自身重

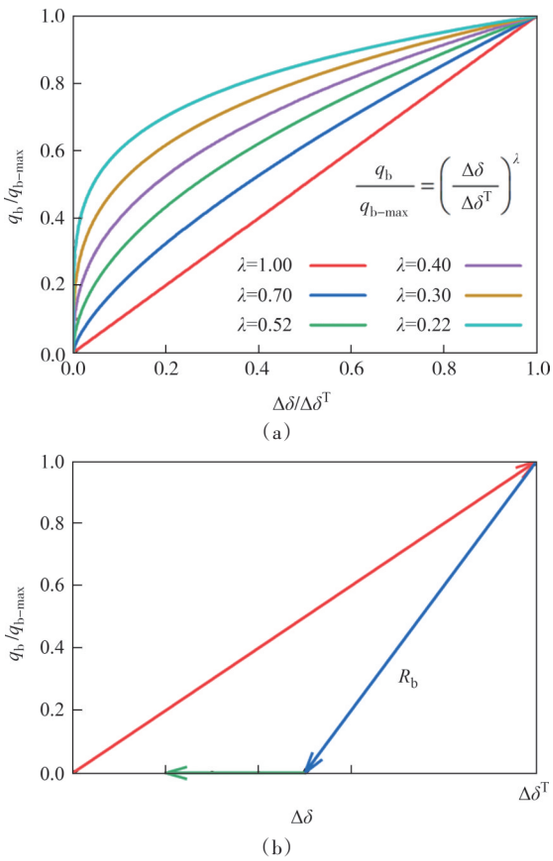


图 6　桩端荷载传递方程

Fig.6　Toe mobilization model

表 5　计算参数

Tab.5　Calculation parameters

参考文献	计算参数	取值	
[23]	λ	0.3	
	R_b	0.1	
[23]	$\Delta\delta^T$	125 mm	
[26]	τ_{max}	0~−32.0 m	12~18 kPa
		−32.0~−65.0 m	18~68 kPa
		−65.0~−85.5 m	68 kPa
	S_1=S_3	0.260 mm^{-1}	
	τ_{rel}/τ_{max}	0.74	
	S_2	0.013 mm^{-1}	
	q_{b-max}	225 kPa	

度和桩顶荷载作用下的竖向应力平衡. 进一步将桩基受力分为两个过程,首先利用数值模型中②号单桩在工况 3 下的桩顶轴力作为桩顶荷载,计算竖向力学响应;其次,将数值模型中②号单桩处的自由时效沉降作为“外荷载”作用于桥梁单桩,计算结果如图 7 所示. 值得说明的是,由于本文算例变形较小,桩土状态位于弹性区间,因此理论值与有限元计算结果基本一致.

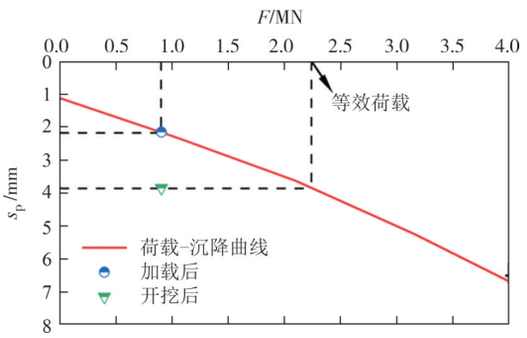


图 7 荷载-沉降曲线

Fig.7 Load-settlement curve

3.3 参数分析

本文算例具有典型性,一般临近市域铁路桥梁的市政道路基坑挖深较浅且围护刚度足够大,同时考虑到本文算例位于深厚软黏土地基且邻近桥桩距基坑较近,因此粗略认为图 7 中作为“外荷载”的时效沉降可作为其余案例沉降的保守估计,不对其展开讨论.

图 8 给出了不同直径的桥桩在加载和开挖往返剪切作用下的竖向响应对比,其中 L 为桩顶至计算点的距离,N 为桩基轴力.由图 8(a)可知,桩基沉降随直径的增加而减小,但当桩基直径超过 1 m 后,继续提高直径对减小沉降的帮助极为有限.观察图 8(b)(c)可以发现,加载阶段大直径桩基的轴力先增大后减小,表明自身重度对变形控制不利;开挖诱发桩基上部的负摩阻力,导致轴力随深度的增大先增大后减小;开挖后的轴力随桩径的增大而增大,且变化速率逐渐增大.事实上,对于灌注桩而言,孔径越大,侧壁土的应力松弛越严重,k_0 越小,对于侧摩阻力的削弱也就越严重;不仅如此,桩基的极限端阻力随桩径增大呈双曲线减小[27].可见,对于桩顶承受荷载不大且后续受近接工程基坑开挖扰动不大的深厚软弱地层中的桥桩桩基,在以桩顶变形为控制目标时,存在一个合理桩径,盲目增大桩径并不是一个好的选择.

图 9 给出不同长度的桥桩在加载和开挖往返剪切作用下的竖向响应对比.由图 9(a)可知,对于桩长 40 m 的较短桩而言,开挖诱发桩基的整体沉降;长桩则表现出接近端承桩的特性,桩基沉降自上而下逐渐变小,以桩身压缩为主;当桩长大于 50 m 时,桩土

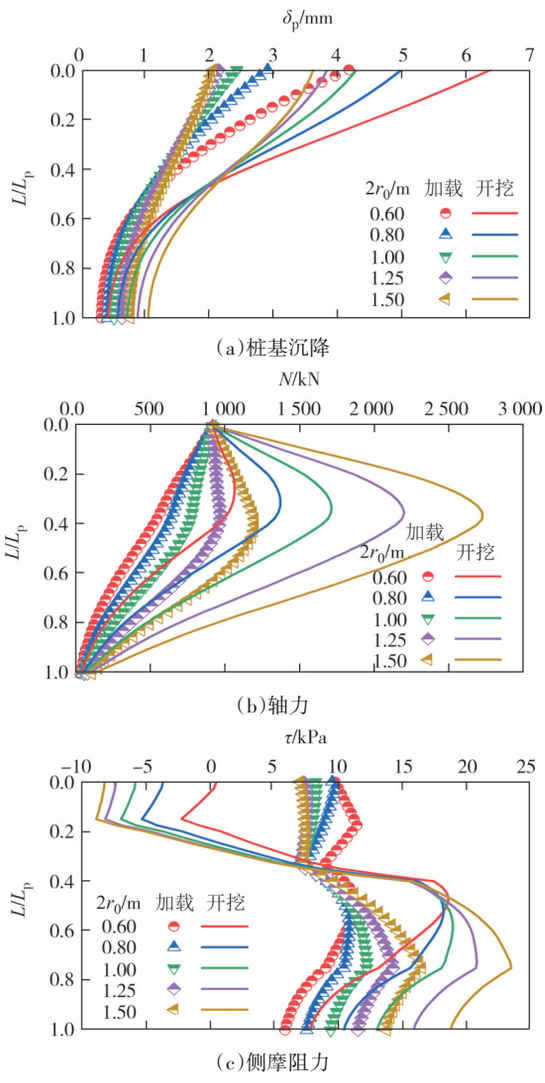


图 8 桩径的影响

Fig.8 Influence of pile diameter

关系基本处于弹性阶段,因此开挖诱发的桩基沉降并不太大.观察图 9(b)(c)可以发现,轴力及轴力最大值所在深度随桩长的增大而增大,且变化速率逐渐减小.即使是短桩,侧摩阻力仍未完全发挥,长桩端部附近的侧摩阻力更是出现拐点;进一步发现所有算例的端摩阻力发挥得较少,说明此时桩基状态相较于极限承载力仍有相当的距离.对于长桩而言,长径比的增加使得桩土刚度减小,从而影响其承载能力与变形能力;综合考虑桩长增加引起的自重变化,同样可以认为,对于桩顶承受荷载不大以及后续受近接工程基坑开挖扰动不大的深厚软弱地层中的桥桩桩基,在以桩顶变形为控制目标时,存在一个合理桩长,盲目增大桩基长度而桩端未能进入坚硬地层,不是一个好的选择.

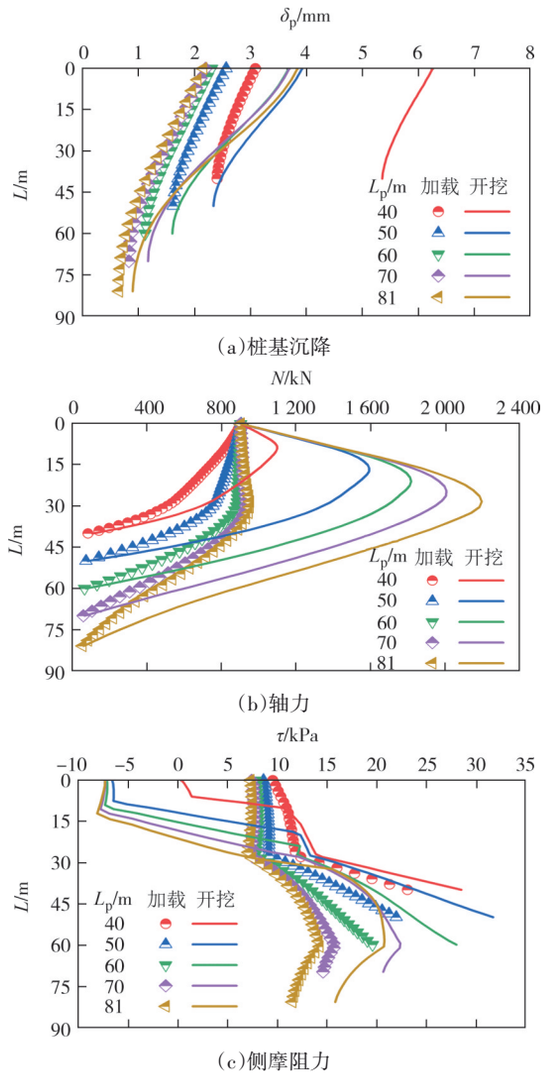


图 9　桩长的影响

Fig.9　Influence of length of pile

4　结 论

1)利用 PLAXIS 3D 软件和软土蠕变模型,建立某市政道路下穿市域铁路桥梁基坑工程的三维数值模型,与实测数据的对比验证了模型的合理性.

2)将软土蠕变模型退化为软土模型,考虑桩顶约束条件,对比分析桥梁群桩的时效水平响应,发现土体蠕变对邻近桥梁群桩变形、内力的影响较大,甚至不亚于墙体瞬时变形的影响;桥梁群桩桩身的变形、内力与离开坑壁的距离呈负相关,并表现出群桩的遮帘作用,桩顶的变形、内力则由桩顶约束条件决定.

3)结合两阶段法,将数值计算得到的土体自由场时变沉降作为“外荷载”作用于桩基,利用考虑桩土往返剪切的荷载传递方法,计算桩身自重、桩顶荷载和后续近接工程基坑开挖作用下桩基的竖向力学响应.计算结果表明,对于桩顶承受荷载不大且后续受近接工程基坑开挖扰动不大的深厚软弱地层中的桥桩桩基,在以桩顶变形为控制目标时,存在合理桩径和合理桩长.

参考文献

[1] ZHANG R J, ZHENG J J, PU H F, et al. Analysis of excavation-induced responses of loaded pile foundations considering unloading effect [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26(2): 320-335.

[2] ZHANG R J, ZHENG J J, YU S. Responses of piles subjected to excavation-induced vertical soil movement considering unloading effect and interfacial slip characteristics [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 36: 66-79.

[3] 程康, 徐日庆, 林存刚, 等. 既有单桩在邻近基坑开挖下的水平向响应简化分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(1): 91-101.
CHENG K, XU R Q, LIN C G, et al. Simplified analysis method for evaluating horizontal deformation of single pile due to adjacent foundation pit excavation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(1): 91-101.(in Chinese)

[4] LIU J W, SHI C H, CAO C Y, et al. Improved analytical method for pile response due to foundation pit excavation[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103609.

[5] ONG D E, LEUNG C E, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. I: stable wall [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 36-44.

[6] ONG D E L, LEUNG C F, CHOW Y K. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement in very soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1462-1474.

[7] NG C W W, WEI J Q, POULOS H, et al. Effects of multipropped excavation on an adjacent floating pile[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(7): 04017021.

[8] NG C W W, SHAKEEL M, WEI J Q, et al. Performance of existing piled raft and pile group due to adjacent multipropped excavation: 3D centrifuge and numerical modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2021, 147(4): 04021012.

[9] LIYANAPATHIRANA D S, NISHANTHAN R. Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 52: 168-181.

[10] SHAKEEL M, NG C W W. Settlement and load transfer mechanism of a pile group adjacent to a deep excavation in soft

clay[J]. Computers and Geotechnics,2018,96:55-72.

[11] SHI J W, WEI J Q, NG C W W, et al. Stress transfer mechanisms and settlement of a floating pile due to adjacent multi-propped deep excavation in dry sand [J]. Computers and Geotechnics, 2019, 116:103216.

[12] SOOMRO M A, MANGNEJO D A, BHANBHRO R, et al. 3D finite element analysis of pile responses to adjacent excavation in soft clay:effects of different excavation depths systems relative to a floating pile[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,86:138-155.

[13] 熊一帆, 刘广新, 杜威, 等. 基于桥桩保护的带撑双排桩基坑支护实例及有限元分析[J]. 地基处理, 2021, 3(3): 215-220.
XIONG Y F, LIU G X, DU W, et al. Case and finite element analyses of foundation pit structure of double-row piles with brace based on bridge pile protection [J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(3): 215-220.(in Chinese)

[14] 应宏伟, 孙威, 吕蒙军, 等. 复杂环境下某深厚软土基坑的实测性状研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 424-430.
YING H W, SUN W, LÜ M J, et al. Measured characteristics of a deep soft soil excavation in complex environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 424-430.(in Chinese)

[15] CHENG K, XU R Q, YING H W, et al. Observed performance of a 30.2 m deep-large basement excavation in Hangzhou soft clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 111: 103872.

[16] 北京金土木软件技术有限公司. PLAXIS岩土工程软件使用指南[M]. 北京: 人民交通出版社,2010.
Beijing Civil King Software Technology Co., Ltd. Guide to the use of PLAXIS geotechnical engineering software[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.(in Chinese)

[17] 杜金龙, 魏祥, 杨敏. 软土基坑逆作开挖的时效分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(S1):395-399.
DU J L, WEI X, YANG M. Time effect analysis of top-down excavation of foundation pits in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008, 30(S1): 395-399.(in Chinese)

[18] 王卫东, 王建华. 深基坑支护结构与主体结构相结合的设计、分析与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
WANG W D, WANG J H. Design, analysis and case histories of deep excavations supported by permanent structures [M]. Beijing:China Architecture & Building Press,2007.(in Chinese)

[19] 冷伍明, 姚康, 门小雄, 等. 考虑工程桩效应的滨海深基坑变形特性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(4): 1347-1358.
LENG W M, YAO K, MEN X X, et al. Analyses on deformation characteristics of coastal deep excavation considering the effect of engineering piles [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(4): 1347-1358.(in Chinese)

[20] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823-1835.

[21] 徐日庆, 程康, 应宏伟, 等. 基于影像源法的基坑开挖引起的土体水平位移预测[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 17-20.
XU R Q, CHENG K, YING H W, et al. Prediction of horizontal displacement of soils caused by excavation of foundation pits based on virtual mirror technology [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41 (Sup. 1): 17-20. (in Chinese)

[22] KORFF M, MAIR R J, VAN TOL F A F. Pile-soil interaction and settlement effects induced by deep excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, 142(8): 04016034.

[23] DIAS T G S, BEZUIJEN A. Load-transfer method for piles under axial loading and unloading [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2018, 144(1): 04017096.

[24] VAN WEELE A F. Cast-in-situ piles -installation methods, soil disturbance and resulting pile behaviour [C]//International geotechnical seminar on deep foundations on bored and auger piles. Ghent, 1988: 219-226.

[25] WANG Z J, XIE X Y, WANG J C. A new nonlinear method for vertical settlement prediction of a single pile and pile groups in layered soils[J]. Computers and Geotechnics,2012,45:118-126.

[26] 陈岳林. 温州软土地基桩基变形性状研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
CHEN Y L. Settlement behavior of pile foundation in Wenzhou soft ground [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005. (in Chinese)

[27] 肖宏彬. 竖向荷载作用下大直径桩的荷载传递理论及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
XIAO H B. Theoretical and application research on load transfer of vertically loading large diameter piles[D]. Changsha: Central South University, 2005.(in Chinese)