

DOI: 10.11779/CJGE2018S1033

冠梁标高对基坑周边环境的影响分析

王正振^{1, 2}, 龚维明^{1, 2}, 戴国亮^{1, 2}, 周勇^{3, 4}, 徐峰^{1, 2}

(1. 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096; 3. 兰州理工大学甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 4. 兰州理工大学西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要:降低冠梁顶标高以减少基坑工程造价是目前比较盛行的一种做法,但其往往导致基坑周边环境变形过大。以某建筑深基坑工程为例,通过对比该基坑开挖期间周围道路沉降、管线沉降、建筑物沉降、桩顶变形和支撑轴力的实测数据来分析支护结构安全有效、建筑物沉降满足要求,但地表沉降过大现象的原因,认为冠梁标高降低会对基坑顶部土体变形产生较大影响。通过有限元模拟对降低冠梁顶标高对基坑坡顶土体变形的影响进行深入分析。结果表明:坑顶土体变形过大并不意味着支护结构失效;冠梁顶标高低后,由于坡顶土体失去侧向约束,在坡顶竖向荷载作用下,会产生较大的沉降和水平变形;土体沉降与水平变形具有相关性,但冠梁顶标高对坡顶土体水平变形的影响程度远远超过其对沉降的影响。建议当基坑周围有道路或管线存在时,谨慎降低冠梁标高,如必须降低,应采取其他有效措施约束土体的变形。

关键词: 基坑监测; 冠梁标高; 变形; 影响分析; 数值模拟

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2018)S1-0205-07

作者简介: 王正振(1989-),男,博士研究生,主要从事沉井、桩基础、深基坑等岩土工程研究工作。E-mail: 230159416@seu.edu.cn。

Influence analysis of top beam elevation on surroundings around deep pits

WANG Zheng-zhen^{1, 2}, GONG Wei-ming^{1, 2}, DAI Guo-liang^{1, 2}, ZHOU Yong^{3, 4}, XU Feng^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structure of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Department of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation in

Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 4. Western Engineering Research

Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Decreasing the top beam elevation to reduce the project cost, which often leads to larger displacement of the surroundings, is very popular in the design of foundation pits. Based on a deep foundation pit project, the phenomenon that the supporting structure is effective, the settlement of buildings meets the design requirements, while the ground settlement is out of control is analyzed by comparing the measured data of the strut forces, displacements of the surroundings and displacements of retaining pile tops. The decrease of top beam elevation is supposed to be a main influence factor for the larger ground settlement. Finally, the finite element simulation method is used to analyze the influence of top beam elevation on the surroundings deeply. The results show that whether the supporting structure is effective or not should not be judged by the displacement of soil at top of the foundation pit. Under the vertical load, large displacement will take place for the soil at top of the foundation pit because of the loss in the lateral restraint caused by the decreasing of top beam elevation. There exists a relationship between the settlement and the horizontal displacement of soil, but the decreasing of top beam elevation has a larger impact on the horizontal displacement than on the settlement. The top beam elevation should not be decreased when roads, pipelines and structures are near to the deep pit, and the effective measures must be taken to restrain the displacement of soil when the top beam elevation is decreased.

Key words: monitoring of deep pit; top beam elevation; displacement; influence analysis; numerical simulation

0 引言

伴随着地下空间开发的热潮,基坑工程向着更深、更大的方向发展^[1-2]。但由于城市可用面积有限,留给

基金项目:“十二五”交通运输重大科技专项项目(201318494160);
2016年度省建设系统科技项目(计划项目)(2016JH05);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX17_0117);中央高校基本科研业务费专项资金项目

收稿日期:2017-06-11

基坑工程的施工场地越来越狭小, 周围环境越来越复杂。诸多基坑紧邻高层建筑或者紧贴地铁车站甚至建于既有地铁隧道之上^[3-4], 因此控制基坑开挖对周围环境的影响成为基坑工程的重中之重。

在建筑基坑中, 由于后续水暖电气管线布设的需要, 为减少基坑回填之后支护结构破除的工作量, 并从基坑工程经济性出发, 常将冠梁顶标高降低 1~1.5 m, 通过放坡或者砌筑砖墙来对其进行处理^[5-8]。然而基坑开挖后放坡或者砌筑砖墙对基坑顶部土体约束作用有限, 这就可能导致基坑周围道路或者管线出现开裂或沉降过大的现象。

对基坑开挖引起支护结构及周边环境变形计算方法及影响因素的研究已取得诸多成果: Moormann 等^[9]通过世界各地的 530 个基坑工程实例, 分析了地表变形与地下水、几何边界条件、支护体系和开挖方式之间的关系; 赖冠宙^[10]等建立了考虑圈梁、腰梁、排桩、支撑和地基空间协同作用的三维有限元分析模型, 分析了圈梁对支护结构侧向位移的影响; Leung 等^[11]介绍了香港地区 14 个基坑的概况, 并通过监测数据说明了支护结构水平变形、地表沉降大小、沉降模式、结构刚度之间的相互关系; 秦昊^[12]从工程实测的角度研究了基坑开挖对邻近地下管线的影响, 并根据弹性地基梁理论推导了由基坑开挖引起的地下管线位移的计算方法; Wang 等^[13]通过上海地区 300 个基坑实例的监测数据总结了支护结构水平位移、周围环境沉降与基坑开挖深度的关系; Hsieh 等^[14]通过现场实测数据,

提出了一种预测地表沉降形状的经验公式, 并用实例对该经验公式进行了验证; 张小伟等^[15]通过有限元软件对基坑变形进行了模拟, 结果表明软土地区渗流作用对基坑变形的影响不容忽视; 李磊等^[7]通过南昌地铁艾溪湖东站深基坑工程的监控数据, 研究了基坑开挖深度和时间对围护结构水平变形的影响; 木林隆等^[16]利用有限元模拟得到了基坑周边土体三维位移场的衰减规律, 由统一表达式表示出来, 并通过二次拟合提出了基坑周边土体三维位移场的简化计算方法。

上述研究成果均未提及降低冠梁顶标高而导致坑顶道路管线变形过大的问题。本文以某建筑深基坑为例, 通过对比该基坑的各项监测数据, 结合基坑支护和防水体系, 认为冠梁顶标高会对基坑坡顶土体变形产生较大影响, 利用有限元对该基坑典型剖面进行模拟, 通过反演得到该基坑的实际坡顶荷载, 进而对降低冠梁顶标高对周围环境的影响进行深入分析。

1 工程概况

某基坑整体呈三角状, 东北侧 20 m 临近某路主干道, 南侧 20 m 亦为道路, 西侧 5 m 为一排二层商品用房; 基坑开挖深度 8.80~10.60 m, 周长约 500 m。基坑与周围建筑物关系如图 1 所示。

1.1 工程地质条件

基坑支护影响范围内共有 7 个工程地质层, 土层条件较差, 各土层参数如表 1 所示。

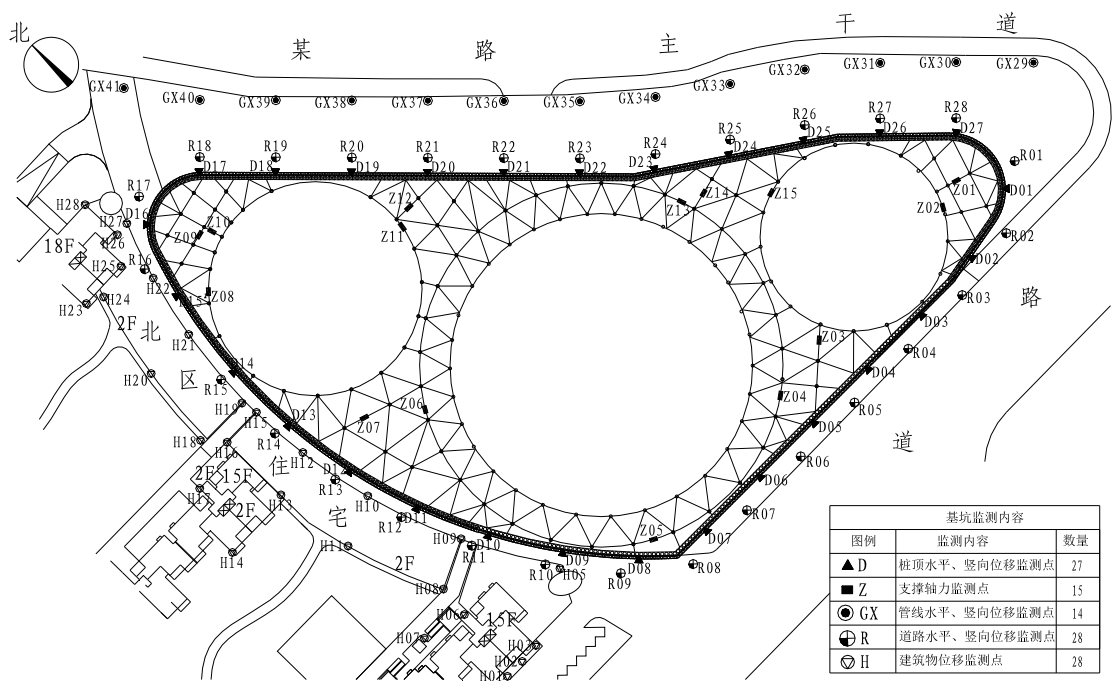


图 1 基坑周围环境信息及监测点布置图

Fig. 1 Surroundings around foundation pit and arrangement of monitoring points

表 1 各土层参数表
Table 1 Soil parameters

土层名称	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	E_{50}^{ref} /kPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /kPa	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /kPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	渗透性
杂填土	1.6	18	2500	2500	10000	10	10	4.0×10^{-5}	弱透水
黏土	0.9	17.8	6800	6800	20400	16.4	19.2	6.25×10^{-7}	不透水
淤泥质粉质黏土	5.8	17.4	4000	4000	16000	10.2	15.5	5.86×10^{-6}	微透水
淤泥质粉质黏土夹粉土	7.9	17.5	4250	4250	17000	12.1	17.7	2.77×10^{-5}	弱透水
粉砂夹粉土	6.1	18.9	8500	8500	25500	2.4	29.2	5.85×10^{-3}	透水
粉砂	14.7	18.8	10000	10000	30000	2.9	32.8	4.68×10^{-3}	透水
泥质砂岩	13	22	75000	75000	225000	50	20	—	不透水

1.2 水文地质条件

场地地下水主要为孔隙潜水及微承压水。孔隙潜水主要赋存于淤泥质粉质黏土夹粉土层及以上土体中，渗透性差、含水量贫乏；微承压水主要赋存于以下的砂性土中。整个场地透水性上弱下强，与长江水水力联系密切；地下水水位埋深为 0.5~0.9 m。

1.3 支护结构概况

基坑采用排桩加一道混凝土内支撑（局部两道）的支护结构：冠梁顶标高下降 1.6 m，放坡处理；排桩桩径 1.0 m(局部 0.9 m)，桩间距 1.2 m(局部 1.1 m)；环形内支撑截面尺寸为 850 mm×750 mm；基坑周边采用三轴深搅桩形成封闭止水帷幕，坑内采用管井降水，共布置 62 口减压井。典型剖面图如图 2 所示。

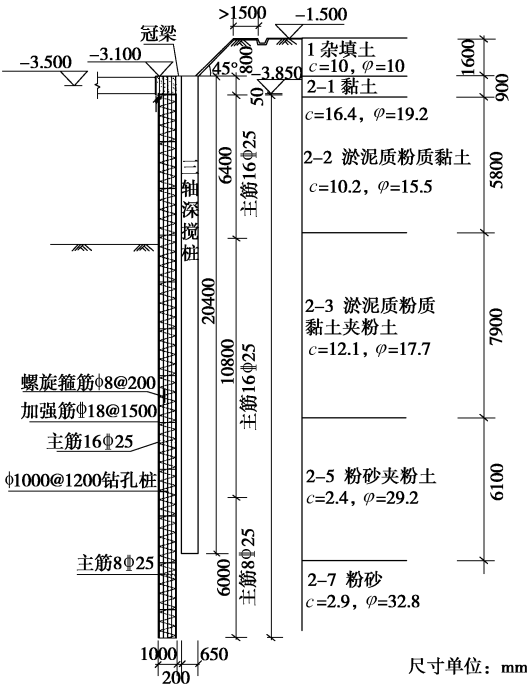


图 2 支护结构剖面图
Fig. 2 Profile of supporting structure

2 基坑监测情况

2.1 监测内容

为说明降低冠梁顶标高对周围环境的影响，本文仅对与其相关的以下5方面内容进行说明分析：①周边道路沉降；②管线沉降；③建筑物沉降；④桩顶变形；⑤支撑内力。对于坑外地下水位监测、立柱沉降等其他监测内容，本文不再赘述。

2.2 监测进程

整个基坑从东北角开始分层分块向东南角推进，现场监测于2013年10月开始，至2014年11月结束，共监测154期，整个监测进程如表2所示。

表 2 基坑监测进程

Table 2 Monitoring process of foundation pit		
序号	施工进度	监测时间
1	东北角土方开挖	2013-10—2013-12
2	其余部位土方开挖，东北角垫层浇筑完毕	2013-12—2014-04
3	东北角、中部负二层施工完毕，东南角底板浇筑	2014-04—2014-06
4	负一层地下室施工、第一层支撑拆除	2014-06—2014-07
5	地下室负一层施工完毕、土体全部回填	2014-07—2014-11

2.3 监测结果

(1) 道路沉降情况
监测结果显示：基坑开挖对周边临近道路有明显影响，基坑周边布置的28个道路沉降监测点的沉降量全部超过报警值（报警值为±24 mm），近三分之一监测点的累计沉降量达到100 mm以上。

以基坑开挖过程引起的东北角和西南角道路沉

降为例,从图3可以看出:从2013年11月25日起,基坑东北角道路监测点(R16~R21)监测数据出现异常且持续发展,12月12日基坑东侧突然发生轻微的地面塌陷。截至2014年1月8日该区域所有测点累计沉降量均超过报警值,其中最大点为R18,其值为116.7 mm。

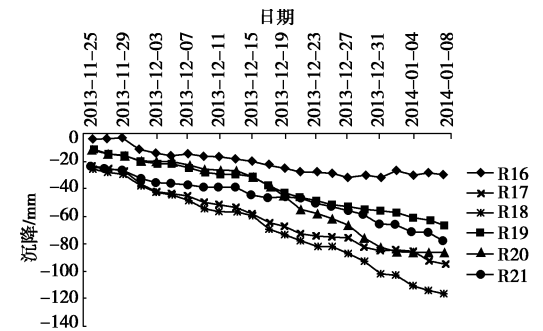


图3 东北角道路沉降-时间曲线

Fig. 3 Settlement-time curves of northeast road

如图4所示,2013年12月24日基坑西南角监测点(R07~R13)数据出现异常且持续发展;12月25日发现基坑西南角周围地表出现裂缝;截至2014年1月14日该区域所有测点累计沉降量均已超过报警值,其中R10测点沉降量达到106.3 mm,裂缝继续扩展。

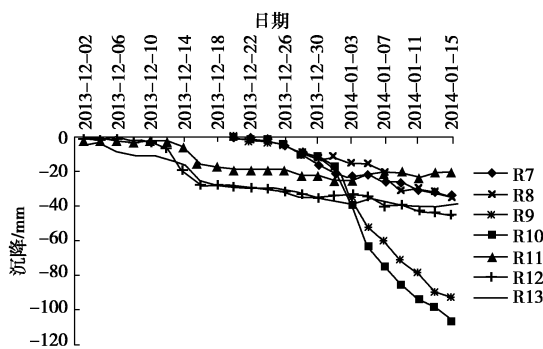


图4 西南角沉降-时间曲线

Fig. 4 Settlement-time curves of southwest road

(2) 管线沉降情况

该基坑周围管线主要分布于基坑东北侧。监测数据显示,管线的沉降情况与道路沉降情况类似,所有监测点的沉降均超过报警值(报警值为 ± 24 mm),GX10监测点的管线累计沉降量达到183 mm,如图5所示。

2013年12月12日基坑东北侧发生轻微的地面塌陷。监测点GX11于当日沉降36.0 mm。2014年3月10日监测点GX10当日沉降了24.67 mm,3月12日现场巡视发现基坑东北侧道路原有裂缝明显扩大,裂缝距离基坑约20 m,长约10 m左右,宽2 cm左右。

(3) 建筑物沉降情况

本基坑周围建筑物均为桩基础,图6显示了建筑

物沉降相对较大的几个监测点的沉降累计曲线,从图中可以看出:本基坑开挖对周围建筑物影响较小,建筑物沉降随着基坑开挖逐渐发展,但所有监测点的沉降累计量均未超过报警值,最大沉降量为H26点所测得的16 mm(报警值为 ± 20 mm)。

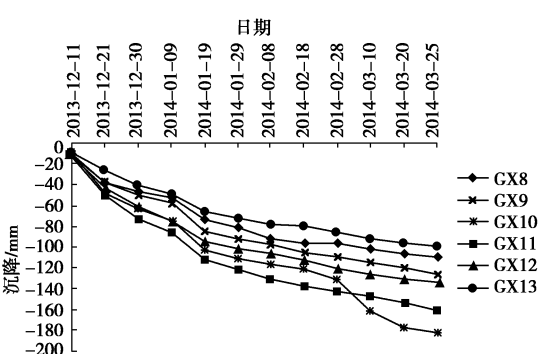


图5 东北侧管线沉降-时间曲线

Fig. 5 Settlement-time curves of northeast pipeline

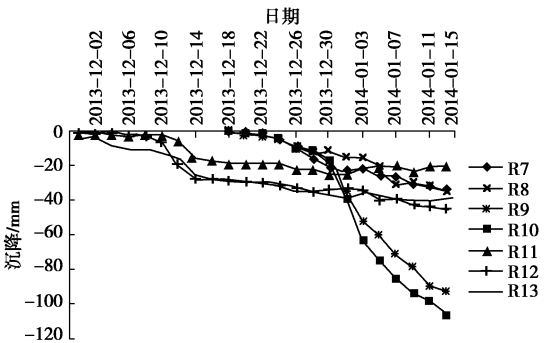


图6 东北角建筑沉降-时间曲线

Fig. 6 Settlement-time curves of northeast building

(4) 桩顶变形情况

基坑开挖对桩顶变形的影响同样较小。开挖过程中所有监测点的桩顶沉降和水平变形均未超过报警值(报警值为 ± 24),最大的D01点的水平变形为22 mm,而沉降量仅有17 mm,如图7和图8所示。在开挖期间,桩顶沉降和水平变形均随基坑开挖深度的加大而逐步增大,变化累计曲线呈持续增长趋势;在底板浇筑完成后,曲线逐渐收敛。

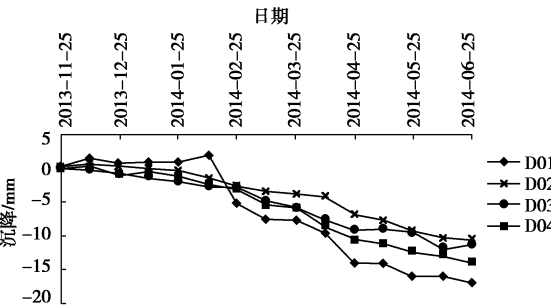


图7 桩顶沉降-时间曲线

Fig. 7 Settlement-time curves of pile top

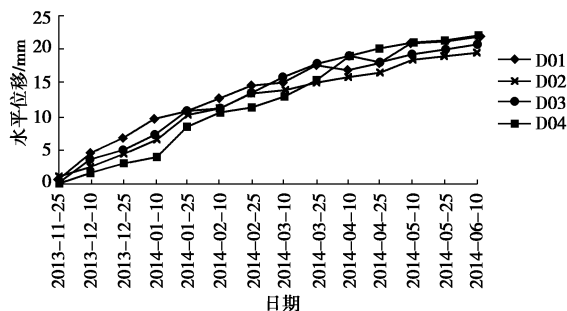


图 8 桩顶水平变形-时间曲线

Fig. 8 Horizontal deformation-time curves of pile top

(5) 支撑轴力变化情况

同样, 支撑轴力的发展和预期一致, 基坑施工过程中所有轴力均未超过报警值。ZL02 点为所有监测点中轴力最大点, 其值为 15105.1 kN (报警值 16000 kN)。图 9 展示了轴力较大的 4 个监测点在基坑开挖过程中的监测数据变化情况, 从图中可以看出, 支撑轴力随着基坑开挖逐渐增大, 基坑见底后轴力基本稳定。

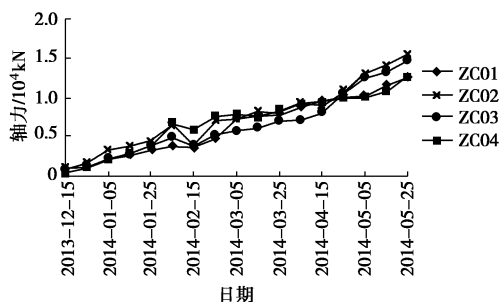


图 9 支撑轴力累计曲线

Fig. 9 Axial-force-time curves of inner supports

2.4 监测结果分析

从以上监测结果可以看出, 桩顶沉降、桩顶水平变形和支撑轴力的累计变化值在整个基坑开挖阶段均处于正常范围, 变化规律符合预期, 这说明基坑支护结构始终处于安全有效的状态, 而基坑周围建筑物沉降量也同样满足要求, 但坑顶道路和管线的沉降却远远超过报警值。文献[8]的基坑监测数据也出现了类似情况, 说明了本文监测数据的可靠性。

基坑开挖引起周围地表沉降的原因主要有两个:

①基坑开挖导致坑外土体侧向应力释放; ②基坑降水导致孔压减小, 有效应力增加, 土体被压缩。

本基坑虽然在内部布置了数量众多的降水井, 但降水井深度较浅, 考虑到基坑底部以下 7 m 范围内为淤泥质粉质黏土夹粉土层, 该土层为弱透土层, 渗透系数较小, 基坑外围布置的止水帷幕深度达到 22 m, 超过基坑深度 12 m, 且坑外地下水位基本保持稳定, 故认为基坑内部降水引起的基坑外围沉降较小。实测的桩顶沉降和桩顶水平变形均较小, 故因为支护结构侧向变形而产生的基坑周围地表沉降量也不应如此

之大。

针对该基坑出现的支护结构安全有效、建筑物沉降满足要求, 但地表沉降过大的现象, 分析其原因应该是地表超载引起较大的土体变形, 而冠梁顶标高降低加剧土体变形的结果: 基坑开挖导致基坑影响范围内的土体应力得到释放, 原本处于平衡状态的土体失去平衡, 支护结构利用自身刚度和支撑轴力弥补释放的土体应力, 使土体保持原有的平衡状态, 从而减小土体变形。但当冠梁顶标高降低 1.6 m 后, 下部土体可通过支护结构保持应力平衡, 但上部 1.6 m 土体是利用放坡 (45° 放坡) 来处理, 土体本身的应力状态遭到破坏, 坑顶土体不断向坑内蠕动, 造成周围地表产生过大的沉降。当坡顶有较大荷载作用时, 土体蠕动速率加剧, 这也是东北角地表沉降比其他部位沉降更大的原因 (基坑东北角坡顶堆放了大量的钢筋等建筑材料)。但对于建筑物而言, 绝大多数荷载通过桩基础传递给深层土层, 所以坑顶土体移动对建筑物影响并不明显。

3 数值模拟与分析

3.1 模型建立

采用有限元软件 PLAXIS 3D 对该基坑典型剖面进行模拟以验证上述分析的正确性。排桩长 23.2 m, 取模型深 50 m; 为消除边界影响, 模型长度和宽度分别取 50 m 和 20 m。模型四周设置法向约束, 其余两向自由; 底边三向约束; 顶边三向自由。模型中共建立 7 层土, 为更好地模拟土层变形, 所有土层均采用土体硬化模型, 模拟参数见表 1。排桩利用刚度等效原则简化为板桩, 板桩参数见表 3。支撑作用利用均布荷载代替。在坡顶作用有宽度 10 m 的矩形荷载。根据上述情况, 分别建立了降低冠梁标高和未降低冠梁标高两种工况下的有限元模型。降低冠梁标高 (上部土体通过放坡来处理) 后的模型如图 10 所示。

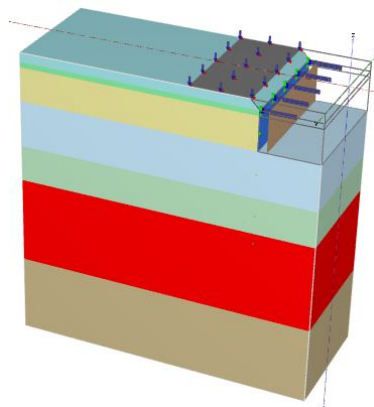


图 10 有限元模型

Fig. 10 Finite element model

表 3 板桩参数表

Table 3 Parameters of sheet pile

材料	厚度 /m	重度 /(kN·m ⁻³)	E /(kN·m ⁻²)	泊松比
板桩	0.785	25	3×10 ⁷	0.2

3.2 模拟工况

实际工程中内支撑会控制桩顶水平变形，故模拟过程中通过控制桩顶水平变形与实测值相同（控制值 20 mm）来确定支撑轴力，通过基坑坡顶最大沉降来反演坡顶荷载。将冠梁顶标高降低 1.6 m 后（顶部 1.6 m 土体通过放坡处理），通过模拟发现当坡顶荷载为 20 kPa 时，坡顶沉降可达到 110.4 mm，与实测值接近，故模拟过程中取坡顶荷载为 20 kPa。

由于模拟的目的在于分析冠梁标高降低对坡顶土体变形的影响，故模拟分为冠梁标高降低和不降低两种工况。

3.3 模拟结果分析

图 11~13 分别展示了冠梁顶标高降低 1.6 m 和不降低两种工况下的板桩水平变形云图、土体沉降云图和土体水平变形云图。

如图 11，两次模拟均通过内支撑很好地将板桩顶部水平变形控制在 20 mm 左右。板桩在基坑开挖完成后的水平变形均呈现出中间大两端小的“凸”型分布特征，这与诸多实测资料结果相同^[5,7-8]，证明了模拟结果的正确性。

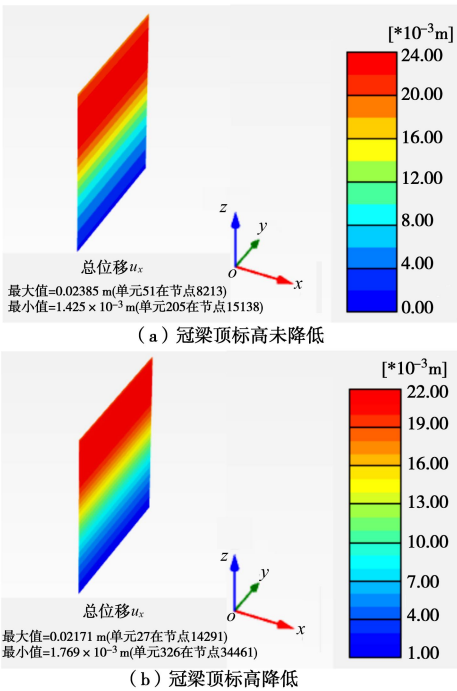


图 11 板桩水平变形云图

Fig. 11 Nephogram of horizontal deformation of sheet pile

从图 12 可以看出，当基坑顶部作用有均布荷载

时，最大沉降区域集中在坑顶地表以下较浅的深度范围内。冠梁顶标高未降低时，基坑顶部土体的沉降云图呈现出对称的“凹”型，最大沉降出现在荷载作用面中部，并非随着距基坑距离的增大而减小，最大沉降量为 93.85 mm。但当冠梁顶标高降低后，虽然基坑顶部土体的沉降云图仍呈“凹”型，但最大沉降区域已向基坑上口线偏移，最大沉降量增至 110.4 mm，增大了 15.8%。

而降低冠梁顶标高对坡顶土体水平变形的影响更大。如图 13 所示，冠梁顶标高未降低时，基坑顶部土体在均布荷载的挤压作用下产生水平变形，受到基坑开挖的影响，靠近基坑上口线的土体水平变形（33.76 mm）大于荷载作用面另一侧（7.75 mm）。而当冠梁标高降低以后，在同样的荷载作用下，靠近基坑上口线的水平变形陡增到 81.11 mm，增长了 240.3%。而另一侧土体水平变形却基本未发生变化。

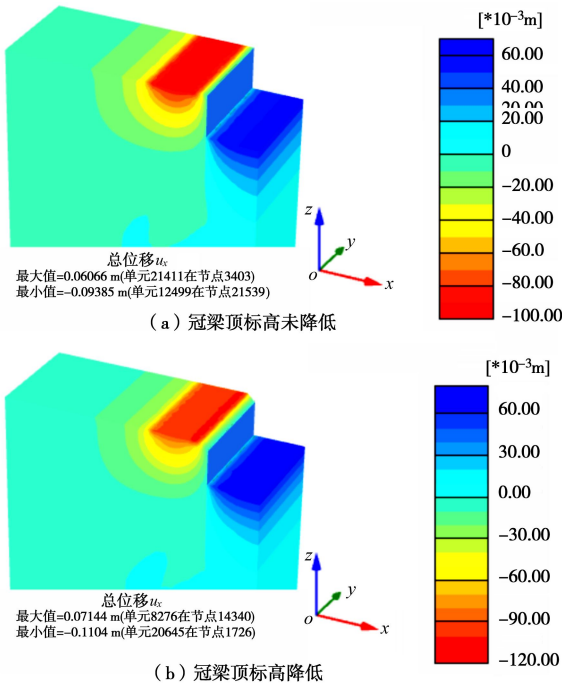
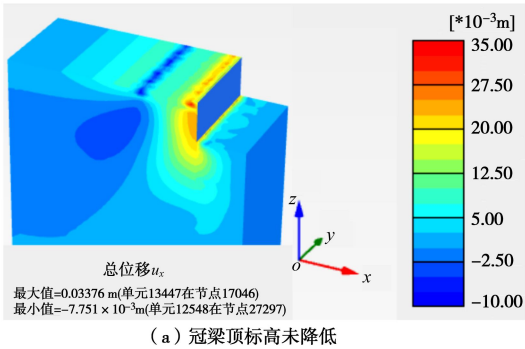


图 12 土体沉降云图

Fig. 12 Settlement nephogram of soil



(a) 冠梁顶标高未降低

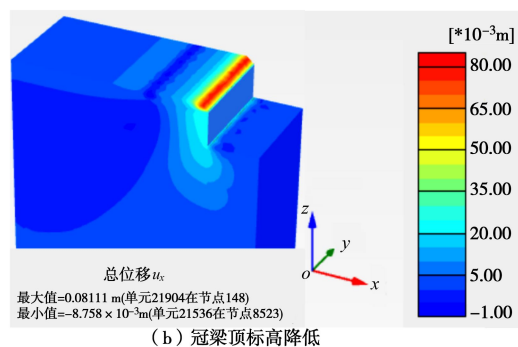


图 13 土体水平变形云图

Fig. 13 Nephogram of horizontal deformation of soil

从整个模拟中还可以看出, 当基坑坡顶土体变形过大时, 基坑支护结构的变形不一定过大, 这也与本文基坑监测结果完全吻合。模拟结果同时也证明了本文对基坑支护结构安全有效、建筑物沉降满足要求、但地表沉降过大现象分析的正确性。

4 结 论

通过上述对某基坑监测数据的分析和有限元模拟可得以下 5 点结论。

(1) 基坑坡顶土体变形过大并不意味着基坑支护结构的失效, 实际中常常出现坡顶土体变形超过预警值, 而支护结构的各项监测数据完全正常的情况。

(2) 基坑设计中将冠梁顶标高降低以减少造价的做法非常盛行, 但设计人员往往忽略了该做法常常导致坑顶土体变形过大的问题, 当坡顶土层土质较差时, 该问题更加严重。

(3) 超载是地表产生较大沉降的主要原因, 但在同样的坡顶荷载下, 由于土体最大变形区域集中在地表以下较浅范围内, 冠梁顶标高降低会丧失对坡顶土体的约束, 故降低冠梁顶标高会增加坡顶土体的沉降量和水平变形; 严重时甚至会造成道路塌陷、管线破裂。

(4) 坡顶土体沉降与其水平变形有相关性, 但冠梁顶标高降低首先导致其水平变形增大, 进而使其沉降量增大。故冠梁顶标高对坡顶土体水平变形的影响程度远远超过对沉降的影响。

(5) 建议当基坑周围有道路或者管线存在时, 谨慎降低冠梁标高; 如必须降低, 应采取其它有效措施约束土体的变形。

参考文献:

[1] 俞建霖, 龚晓南. 基坑工程变形性状研究[J]. 土木工程学报, 2002, 35(4): 86 - 90. (YU Jian-lin, GONG Xiao-nan.

Research on deformation of foundation pit engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2002, 35(4): 86 - 90. (in Chinese))

[2] OU Chang-yu. Deep excavation: theory and practice[M]. London: Taylor and Francis, 2006.

[3] 刘国彬, 黄院雄, 侯学渊. 基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 202 - 207. LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong, HOU Xue-yuan. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(2): 202 - 207.

[4] 俞 缙, 许琼鹤, 邢威巍, 等. 基坑工程下地铁隧道隆起位移数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊): 653 - 657. (YU Jin, XU Qiong-he, XING Wei-wei, et al. Numerical analysis of upwarping deformation of existing tunnels under a new tunnel's excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S0): 653 - 657. (in Chinese))

[5] 陈泽昌. 成都地铁 2 号线站东广场站基坑监测及位移反分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2011. (CHEN Ze-chang. Monitoring and Back Analysis on Displacement of the Foundation Pit of Zhandong Guangchang Station in Line 2 of Chengdu Metro[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese))

[6] 安关峰, 宋二祥. 广州地铁琶州塔站工程基坑监测分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 26(3): 333 - 337. (AN Guan-feng, SONG Er-xiang. The analysis of excavation monitoring for the Pazhou subway station in Guangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 26(3): 333 - 337. (in Chinese))

[7] 李 磊, 段宝福. 地铁车站深基坑工程的监控量测与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 1): 2684 - 2691. (LI Lei, DUAN Bao-fu. Monitoring measurement and numerical simulation for deep foundation pit of subway station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2684 - 2691. (in Chinese))

[8] 王旭军. 上海中心大厦裙房深大基坑变形特性及盆式开挖技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2014. (WANG Xu-jun. Deformation Characteristics of Shanghai Tow Podium Pit and Analysis of Basin Excavation Technique[D]. Shanghai: Tongji University, 2014. (in Chinese))

[9] MOORMANN C. Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 87 - 98.