

CFG 桩基坑内施工对基坑周围环境稳定性的影响^①

刘熙媛^{1,2}, 毛清志¹, 付士峰³, 胡世飞¹

(1. 河北工业大学土木工程学院, 天津 300401; 2. 河北省土木工程技术研究中心, 天津 300401;

3. 河北省建筑科学研究院, 河北 石家庄 050021)

摘要:在地下工程中, 由于天然地基承载力不足, 带有地下室的主体结构采用 CFG 桩复合地基。因为 CFG 桩长螺旋钻施工设备限制, 地下室底板下的 CFG 桩必须在深基坑开挖一部分后进行施工。在某深基坑工程中, 随着 CFG 桩的施工, 基坑周围地表出现明显开裂现象。为探究其原因, 结合该基坑工程实例, 利用 FLAC^{3D} 软件, 通过数值模拟分析考虑渗流作用下 CFG 桩基坑内施工对基坑周围地表变形的影响规律, 并把计算结果同实际监测数据进行对比分析。研究表明: CFG 桩在部分开挖基坑内施工的快速取土作用对基坑内被动土压力区产生扰动, 削弱原有的被动土压力, 导致基坑周围土体变形。基坑周围地表变形的影响范围超出 2 倍基坑深度的监测范围, 因此, 部分开挖基坑内施工 CFG 桩的基坑工程周围环境的监测范围应在满足国家规范要求的基础上适当增大。根据计算结果建议类似基坑工程监测范围距基坑边缘的距离采用基坑开挖深度与基坑底面以下 CFG 桩长之和。类似基坑工程设计应加大支护结构和止水帷幕深度, 施工时从基坑内部向外部隔桩跳打, 并适当增加工期, 将有利于降低由于 CFG 桩基坑内施工对基坑周围土体的影响。

关键词: CFG 桩; 基坑支护; 稳定性

中图分类号: TU47

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0834-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0834

Influence of CFG Piles Construction in Foundation Pit on Surrounding Environmental Stability

LIU Xi-yuan^{1,2}, MAO Qing-zhi¹, FU Shi-feng³, HU Shi-fei¹

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Civil Engineering Technology Research Center of Hebei Province, Tianjin 300401, China;

3. Hebei Academy of Building Research, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract: In underground engineering, the main structure with the basement is built with CFG pile composite foundation because the natural ground bearing capacity is insufficient. Because the construction length of the CFG pile is limited by the spiral drilling machine, CFG piles under the floor of the basement must be constructed after a part of the deep foundation pit is excavated. In certain deep foundation pit engineering with CFG pile construction, there is an obvious crack phenomenon on the ground surface around the foundation pit. In order to explore its causes, the deformation characteristics of the foundation pit are analyzed considering the action seepage when CFG piles are constructed in the foundation pit after part excavation. The analysis uses FLAC^{3D} as the numerical simulation tool. The calculated results are compared with actual monitoring data of the foundation pit. Finally, the causes of cracks in the ground around the foundation pit during construction are studied. The results show that the rapid sampling effect in the foundation pit de-

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 河北省建设科学技术研究计划(2012-156)

作者简介: 刘熙媛(1973-), 女, 副教授, 主要从事岩土工程等方面的教学和科研。E-mail: liuxiyuan721@126.com。

creases the earth pressure in the passive zone of the foundation pit when CFG piles are constructed in the foundation pit after part excavation. The effect scope of earth deformation around a foundation pit is beyond the scope of monitoring which is twice the depth of the foundation pit. Therefore, the scope of monitoring of the ground deformation around similar foundation pits should increase appropriately on the basis of meeting the requirements of the National Standard. According to the calculation results, it is suggested that the scope of monitoring in similar foundation pit engineering should adopt the sum of the foundation pit excavation depth and the CFG pile length at the foundation pit bottom. Similar foundation pit engineering design should increase the length of the support structure and the depth of the waterproof curtain. Construction of CFG piles in foundation pits should be from the inside to the outside edge of the foundation pit with piling every a few piles. The construction time should increase appropriately. These measures will help to reduce the deformation of surrounding soil due to the construction of CFG piles in foundation pits after part excavation.

Key words: CFG pile; foundation pit support; stability

0 引言

CFG 桩复合地基具有用材经济、施工快捷、加固效果良好等优点,在实际应用中取得了良好的社会效益和经济效益^[1]。最近在某深基坑工程中,基坑开挖深度 9.5 m,而地下结构的地基基础设计采用了 CFG 桩复合地基,其最大桩长接近 25 m。由于 CFG 桩成桩设备的施工桩长有限,不具备在地面进行深基坑底面以下 CFG 桩施工的能力,工程人员不得不在已部分开挖的深基坑中采用长螺旋施工工艺进行 CFG 桩施工。但是在 CFG 成桩过程中,该基坑周围地面及马路多处出现开裂,给周围居民的生活、工作带来诸多不便,同时也给建设单位和生产单位造成一定的经济损失,严重影响了施工进度。

针对这一实际工程问题,在深基坑支护和施工时,如果必须在部分开挖基坑内施工 CFG 桩复合地基,如何考虑其对支护结构稳定性的影响,并确保基坑周围既有建筑不会因此产生过大沉降、倾斜或开裂,已成为当地建设、施工及监理单位面临的疑难问题之一。

目前关于该课题在国内外的相关研究比较少,一部分研究仅仅提出了出现该问题时如何治理,并没有分析基坑开裂的机理或提出如何去改进设计和施工方式^[2]。因此,研究部分开挖基坑内施工 CFG 桩对基坑周围稳定性的影响具有重要意义^[3]。

1 工程概况

该基坑工程长约 121.1 m,宽约 86.89 m。基坑开挖深度达 9.5 m。基坑内拟建 6 栋建筑,包括 5 栋高层住宅楼和一栋文化市场。场地北侧现有一栋 7

层某市群众艺术馆。平面布置见图 1。

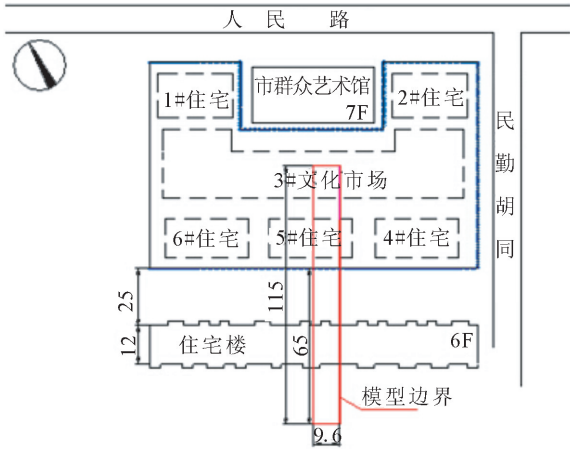


图 1 基坑建模位置示意图(单位:m)
Fig.1 Modeling position of the foundation pit (unit: m)

该工程的重要性等级为一级,场地复杂程度等级为二级,地基复杂程度等级为二级,建筑物抗震设防类别为丙类,岩土工程勘察等级为甲级,地基基础设计等级为甲级。基坑内建筑物采用长螺旋钻孔泵压混凝土桩(CFG 桩)复合地基,桩身混凝土强度等级为 C20 和 C25,桩径 400 mm,桩长为 19~24.5 m,桩间距为 1.6 m。

2 基坑开挖方案及止水帷幕设计

该基坑工程支护结构安全等级为一级,采用钻孔灌注桩加三道锚杆的支护形式。基坑支护桩桩顶在地下 3.0 m 处,桩径 0.6 m,桩间距为 1.2 m,桩长为 13.0 m。桩体的混凝土强度等级为 C25。基坑开挖设计方案为:(1)开挖 1:将基坑开挖至 3.3 m,施工第一道锚杆;(2)开挖 2:基坑开挖至 5.3 m,施工

第二道锚杆;(3)在基坑内施工 CFG 桩;(4)开挖 3:继续开挖至 7.3 m,进行第三道锚杆的支护;(5)开挖 4:将基坑开挖到设计深度 9.5 m。

场地浅层地下水主要为孔隙潜水-微承压水,勘察期间稳定水位埋深 3.60~4.40 m。基坑北、南及东侧采用两排深层搅拌桩止水帷幕,从地面以下-1.5 m 处做止水帷幕,桩长 14 m,桩径 0.65 m、咬合 0.2 m,帷幕宽度为 1.10 m。由于该基坑西侧与另一开发地块相连,故采用单排深层搅拌桩止水帷幕。

3 基坑施工过程三维数值模拟分析

3.1 本构模型及材料参数

本文运用 FLAC^{3D}有限差分软件,依据上述工

程建立三维基坑分析模型。

土体采用摩尔-库伦模型。基本假设为:(1)同一种材料其材质是均匀的、各向同性的;(2)整个模拟分析过程中假定土体为理想弹塑性材料;(3)支护结构和锚杆假设为理想线弹性材料;(4)假设土中的渗流为短期行为,不考虑土体的固结;(5)不考虑在施工过程中由于施工支护桩及锚杆对土体的扰动。

模型土层参数见表 1,围护结构参数见表 2,模型中锚杆的材料参数见表 3。

3.2 模型建立及网格划分

根据前人的大量实践研究表明,基坑开挖的影响宽度为基坑开挖深度的 3~4 倍^[4-5],影响深度为

表 1 土层参数表
Table 1 Parameters of soils

土层 编号	名称	弹性模 量/MPa	泊松比	渗透系数 /(m·d ⁻¹)	容重 /(kN·m ⁻³)	黏聚力 /(kN·m ⁻²)	内摩擦 角/(°)	干重度 /(kN·m ⁻³)	体积模 量/MPa	剪切模 量/MPa
(1)	素填土	15.39	0.35	0.15	18.9	11	23.8	15.0	17.10	5.70
(2)	粉土	15.42	0.35	0.20	18.9	10	24.7	15.1	17.13	5.71
(3)	黏土	6.04	0.35	0.05	17.4	33	8.9	12.6	6.71	2.24
(4)	粉质黏土	5.35	0.35	0.15	19.2	20	10.3	15.3	5.94	1.98
(5)	粉土	14.69	0.35	0.20	19.3	10	25.1	15.5	16.32	5.44
(6)	粉质黏土	4.93	0.35	0.15	18.6	20	11.0	14.4	5.48	1.83
(7)	粉土	15.73	0.35	0.2	19.3	11	24.9	15.5	17.48	5.83
(8)	粉质黏土	5.84	0.35	0.15	19.2	19	10.7	15.3	6.49	2.16
(9)	粉土	9.52	0.35	0.25	19.4	11	19.3	15.5	10.58	3.53
(10)	粉质黏土	5.94	0.35	0.15	19.5	19	10.6	15.7	6.60	2.20
(11)	粉土	10.79	0.35	0.2	20.1	10.6	21.5	16.5	11.99	4.00
(12)	粉质砂土	12.74	0.35	0.15	20.0	10	23.2	16.7	14.16	4.72
(13)	粉质黏土	7.67	0.35	0.2	20.0	20	15.1	16.6	8.52	2.84
(14)	粉土	15.67	0.35	0.15	19.7	11	21.2	16.1	17.41	5.80
(15)	粉质黏土	9.28	0.35	0.25	19.9	19	16.8	16.3	10.31	3.44
(16)	黏土	8.64	0.35	0.15	19.2	33	18.0	15.0	9.60	3.20
(17)	粉质黏土	9.55	0.35	0.25	20.0	21	16.2	16.5	10.61	3.54

表 2 围护结构材料参数表

Table 2 Material parameters of the retaining structure

名称	体积模量/MPa	剪切模量/MPa
围护结构	2.33×10 ⁴	1.08×10 ⁴

开挖深度的 2~4 倍^[6-7]。由于该工程的特殊性,在已开挖基坑内施工 CFG 桩势必会增大影响范围。考虑基坑开挖深度为 9.5 m,CFG 桩的施工深度为 24.5 m。模型的长度大致取 CFG 桩深度的三倍,所

以该模型的高度定为 100 m,CFG 桩间距为 1.6 m。为了计算及建模方便,模型的宽度取部分基坑为 9.6 m,长度为从基坑中心点开始向基坑外侧延伸 115 m,基坑边缘距模型边界为 65 m,故整个模型的尺寸为 9.6 m×115 m×100 m,其所取的位置如图 1 所示,模型如图 2 所示。基坑边缘已有的建筑物在该模型中只模拟其基础底面处的面荷载。

表 3 锚杆材料参数表
Table 3 Material parameters of the bolts

名称	水平间 距/m	竖向间 距/m	入射角 /(°)	总长/m	自由段 长度/m	锚固段 长度/m	配筋	支锚刚度 /(MN·m ⁻¹)	预应 力/kN	锚固体 直径/mm
锚杆①	1.2	3.3	15	14	7	7	2Φ ^s 15.2	15	100	150
锚杆②	1.2	2	15	15	5	10	2Φ ^s 15.2	30	140	150
锚杆③	1.2	2	15	20	5	15	3Φ ^s 15.2	30	200	150

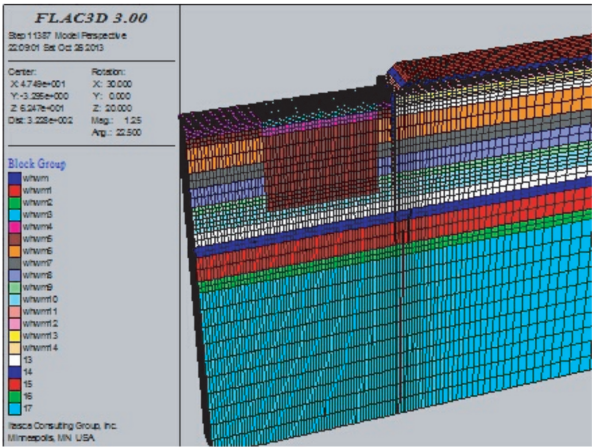


图 2 基坑模型图

Fig.2 Model of the foundation pit

3.3 基坑实际监测方案及监测结果

该工程在基坑周围共布设了 21 个监测点,其中监测点 16 位于本次基坑建模范围之内,可以与数值模拟中相应位置的基坑变形数值进行对比。实际监测点 16 的位移见表 4。

表 4 实际监测 16 点位移表

Table 4 Displacement of actual monitoring points 16

开挖 1/mm	开挖 2/mm	开挖 3/mm	开挖 4/mm
1.3	2.51	11.62	12.62

4 数值仿真结果及分析

在本工程实际施工过程中,随着 CFG 桩的施工,基坑南侧的原有家属楼和距基坑 23 m 和 35 m 左右的地方都出现了裂缝,基坑北侧 20 m 左右的地面也出现东西方向的裂缝,最大裂缝宽度 5.5 mm,严重影响了周围建筑物的安全和稳定。所以本文利用 FLAC^{3D}软件对基坑开挖及降水进行全程模拟,分析基坑开挖及 CFG 桩施工对周围环境的影响。以工程实际监测的地表沉降值、支护结构位移值和基坑的变形值作为判断模型参数合理性的参照依据,在考虑渗流情况下建立与实际监测结果位移发展趋势以及位移值比较吻合的模型。在此基础上,通过修改基坑设计参数和施工方案,对考虑渗流和不考虑渗流情况、不同 CFG 桩施工顺序情况、不同支护桩长度、不同止水帷幕深度情况进行模拟,并进行比较分析,以提出合理的施工方案,并为以后工程实践提供参考。

4.1 考虑渗流与不考虑渗流情况的模拟结果

通过数值模拟分别计算基坑周围地表沉降及围护结构的变形。实际工程中的监测点 P16 正好在模型之内。基坑顶监测点 16 的实际位移值与数值

模拟中相应位置的基坑变形数值对比见图 3。

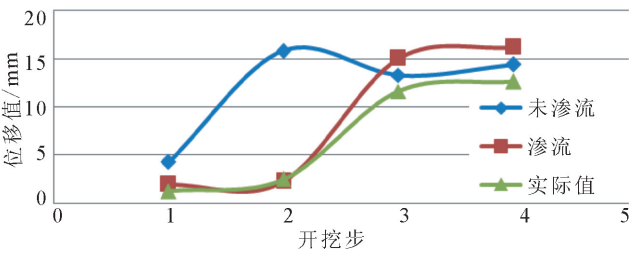


图 3 基坑实测与模拟位移对比

Fig.3 Comparison of the displacements measured in the foundation pit and simulated by the model

通过分析可以看出,部分开挖基坑内施工 CFG 桩的过程对基坑周围影响的数值模拟在考虑渗流的情况下更加合理,同时说明模型中参数选择基本合理。考虑渗流的情况下基坑周围地表沉降及围护结构的变形如图 4。

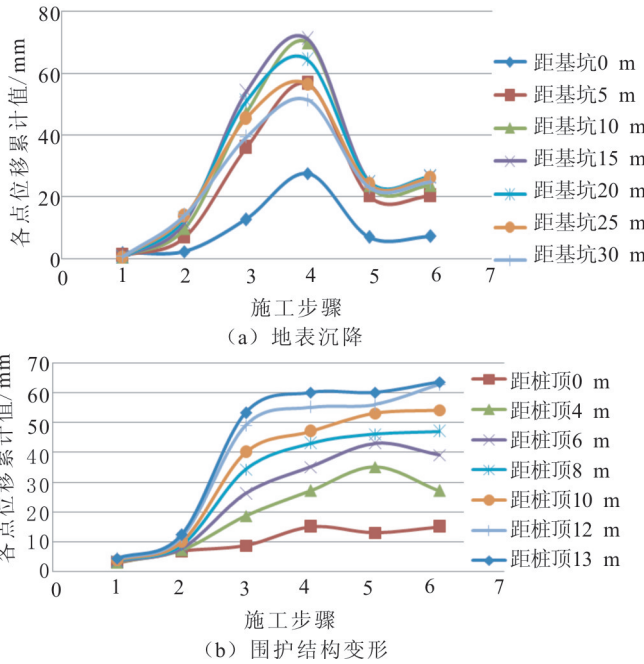


图 4 考虑渗流基坑周围地表和围护结构各点位移曲线

Fig.4 Displacement curve of each point of surface around the foundation pit and retaining structure considering the seepage flow

图 4 中施工步骤 1~6 分别为:第一次开挖、第二次开挖、CFG 桩成孔施工、CFG 桩施工完成达到标准强度、第三步开挖、第四步开挖施工完成。由图 4 可知,在基坑内施工 CFG 桩阶段(图中施工步骤 3 和步骤 4),基坑周围土体位移迅速增大,表现为施工步骤 3 处地表位移产生突变,相应的基坑围护结构的位移也开始增大。此后,随着 CFG 桩施工完

成,基坑周围土体变形逐渐恢复。基坑周围土体变形最大值出现在 CFG 桩施工阶段。这和实际工程相吻合。由此可知,造成该基坑周围地表开裂的原因是由于 CFG 桩的快速施工,使得基坑内土体被迅速取出,基坑底部被动区土压力急剧减小,导致支护桩的位移随着桩的深度增加而增大。

在施工步骤 4(CFG 桩施工完毕),距离基坑边缘 0~30 m 的地表位移变化趋势是先增大后减小,在距离基坑边缘 15~25 m 处土体的位移变化值最大。实际工程中距离基坑边缘 25 m 左右的位置恰好是基坑南侧家属楼所在位置。由此可知,此基坑工程按规范设定的 2 倍基坑深度的监测范围不能满足实际工程变形监测的需要。所以在部分开挖基坑内施工 CFG 桩体时,工程的监测范围应该适当增大以确保基坑周围建筑物的安全。本工程基坑开挖深度 9.5 m,基坑底部 CFG 桩的最大桩长 24.5 m,因此,根据上述计算结果,建议类似基坑工程监测范围距基坑边缘的距离采用基坑开挖深度与基坑底面以下 CFG 桩长之和。

4.2 基坑内不同 CFG 桩施工顺序的数值模拟

为了分析基坑 CFG 桩成桩顺序对基坑稳定性的影响,本文模拟了四种成桩顺序,包括原施工方案(由基坑外侧向基坑内侧,隔桩间隔跳打施工 CFG 桩)和三种模拟方案:(1)由基坑外侧向内侧,隔排施工 CFG 桩;(2)由基坑内侧向外侧,隔桩间隔跳打施工 CFG 桩;(3)由基坑内侧向外侧逐排施工 CFG 桩,三种方案模拟 CFG 施工完成后基坑周边位移值如图 5。

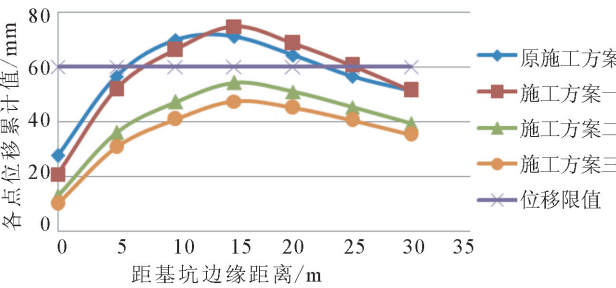


图 5 各施工方案基坑周围土体位移对比

Fig.5 Soils displacement comparison around the foundation pit using different construction plans

CFG 桩体施工方案一在距离基坑边缘较近的位置有一定的作用,但是在基坑南侧建筑物所在位置,土体位移超出了规范中规定的基坑周围土体的位移限值(60 mm),而且该区域塑性区域发展迅速。方案二和方案三在位移值上均能够满足规范要求。

方案三要求 CFG 桩的施工方式是从基坑中心向基坑外围施工,而且前面施工的桩体需要达到一定强度才能进行下一排桩的施工。该施工方法在工期短、施工速度比较快的工程中很难操作。通常情况下 CFG 桩体的钻孔施工都是从场地的边缘开始,该方案中需要将钻机移到基坑的内部,将增大施工难度。而方案二采用由内向外梅花式的隔桩跳打的施工方法,同样需要将施工机械移到基坑中心进行施工,虽然基坑周围土体的位移较方案三来说稍大,但是其优点在于工程所耗费的时间比较少。

综上所述,在部分开挖基坑内施工 CFG 桩过程中,最好采用梅花式隔桩跳打的方式进行施工,如果施工条件允许,最好从基坑的中心向基坑边缘施工,并适当延长施工工期以保证 CFG 桩体的强度,减小由于 CFG 桩施工对基坑内大量快速取土的影响,从而有效控制基坑周围土体的变形。

4.3 不同支护桩长度对基坑开挖变形的影响

为了提升类似工程的安全性,本文模拟了支护桩长分别为 14.0、15.0、17.0、19.0 和 21.0 m 的情况。模拟结果见图 6。

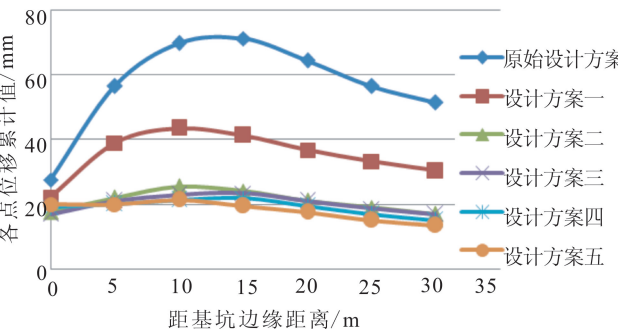


图 6 不同支护方案下 CFG 桩施工完毕后基坑位移曲线

Fig.6 Displacement curve of each point in the foundation pit after CFG piles construction using different support schemes

图 6 可知,基坑支护长度越大,其周围土体位移值越小,当支护桩超过 15 m 时,随着支护桩长度增加,土体位移值变化不大,说明此时桩长增加对基坑周围土体位移的影响逐渐减小。故本基坑的支护结构长度的敏感值在 15 m 左右,而原设计方案中支护桩长 13 m。因此在该工程中,支护结构的长度选用基坑开挖深度与 CFG 桩长之和的 0.4~0.5 倍时,基坑支护效果最经济有效。

4.4 不同止水帷幕长度对基坑开挖变形的影响

由于本工程土层基本上为粉土和粉质黏土,其

渗透系数在 0.15 ~0.25 m/d,所以增大基坑止水帷幕的长度有助于改变土体内水的渗流路径,减小渗流作用造成的土体的位移值。本文在原止水帷幕长度 14 m 的基础上,模拟了增加止水帷幕长度下基坑的变形,以分析不同止水帷幕长度对基坑开挖变形的影响。模拟的止水帷幕深度分别为15.0、16.0、17.0、18.0、19.0 和 20 m。模拟结果如图 7 所示。

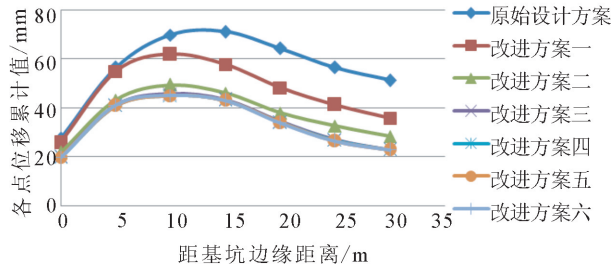


图 7 不同止水帷幕长度下 CFG 桩施工后基坑位移曲线对比

Fig.7 Displacement curve of each point in the foundation pit after CFG piles construction with different lengths of waterproof curtain

由图 7 可知,本工程止水帷幕的敏感深度在 18 ~20 m,超过之后增加止水帷幕长度的效果不再明显。此止水帷幕深度大概为基坑开挖深度与 CFG 桩长之和的 0.6~0.7 倍。在方案一中,基坑止水帷幕加长之后,距基坑 0~30 m 地表各点的位移值比原设计方案位移的减小值从 1.67 mm 增长到 15.41 mm,说明改变止水帷幕的深度对于减小距离基坑边缘较远区域的位移作用更大。

5 结论

- (1) 部分开挖基坑内施工 CFG 桩时,由于基坑内的快速取土作用,对基坑内被动土压力区产生扰动,消弱原有的被动土压力,导致基坑周围土体变形,建筑物开裂损坏。
- (2) 对于部分开挖基坑内施工 CFG 桩的基坑工程,基坑周围环境的监测范围在满足国家规范要求的基础上应该适当增大。建议采用基坑开挖深度与基坑底面以下 CFG 桩长之和。如果有重要建筑物时,监测范围应该进一步增大。
- (3) 通过改变 CFG 桩体的施工顺序,从基坑内部向外部隔桩跳打,并适当增加工期,有利于降低 CFG 桩施工对基坑周围土体的影响。
- (4) 通过增加基坑支护结构的长度可以有效减

小基坑周围土体的变形。在该工程中,支护结构的长度选用基坑开挖深度与 CFG 桩长之和的 0.4~0.5倍时,基坑支护效果最经济有效。

(5) 如果基坑内土体渗透特性基本相同,通过增加止水帷幕的长度可以减小渗流引起的基坑周围地表沉降。数值模拟计算表明,该工程止水帷幕长度选用基坑开挖深度与 CFG 桩长之和的 0.6~0.7 倍时,止水效果最经济有效。

参考文献(References)

[1] 张建隽.CFG 桩复合地基工作性状及工程应用研究[D].太原:太原理工大学,2008.
ZHANG Jian-juan.Study on Working Behavior and Engineering Application of CFG Pile Composite Foundation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2008.(in Chinese)

[2] 冯志先,申海森,万林海,等.软土地区 CFG 桩施工对周围环境影响分析[J].华北水利水电学院学报,2004,25(1):58-60.
FENG Zhi-xian, SHEN Hai-sen, WAN Lin-hai, et al. Analysis of the Effect of CFG Piles Construction on the Surrounding Environment in Soft Soil[J]. Journal of North China of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2004, 25(1): 58-60. (in Chinese)

[3] 姜晨光.基坑工程理论与实践[M].北京:化学工业出版社,2009:4-6.
JIANG Chen-guang. Excavation Theory and Practice [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009: 4-6. (in Chinese)

[4] 熊保林,王希良,路春娇.高边坡预应力锚索格子梁加固系统三维有限元分析[J].铁道建筑,2010(2):67-70.
XIONG Bao-lin, WANG Xi-liang, LU Chun-jiao. Three-dimensional Finite Element Analysis of High Slope Prestressed Anchor Lattice Beam Reinforcement System[J]. Railway Engineering, 2010(2): 67-70. (in Chinese)

[5] 刘健航,侯学渊.基坑工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1997.
LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Excavation Engineering Handbook[M]. Beijing: China Building Industry Press, 1997. (in Chinese)

[6] 王芳,郭红仙.带阳角基坑空间效应的三维数值分析[J].铁道建筑,2006(12):69-72
WANG Fang, GUO Hong-xian. The Three-dimensional Numerical Analysis of the Pit Spatial Effect With a Positive Angle [J]. Railway Engineering, 2006(12): 69-72. (in Chinese)

[7] 陆培毅,李绍忠,顾晓鲁,等.基坑支护结构的时空分析[J].岩土力学,2004,25(1):121-124.
LU Pei-yi, LI Shao-zhong, GU Xiao-lu, et al. Space Analysis of Retaining Structures for Foundation Pits [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 121-124. (in Chinese)