

超大规模基坑工程群开挖相互影响的分析与对策

沈 健

(华东建筑设计研究院有限公司地基基础与地下工程设计研究所, 上海 200002)

摘 要: 天津于家堡基坑工程群开挖体量巨大, 且面临着多个距离较近的相邻基坑开挖的相互影响问题, 采用三维数值模型对基坑工程群的开挖进行模拟, 计算结果表明基坑群开挖造成距离较近的基坑之间的坑外地面沉降叠加, 并影响支撑轴力的分布。结合计算结果, 提出合理的基坑开挖顺序、设计加强建议以及施工控制措施。

关键词: 基坑群; 相互影响; 三维数值分析

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0272-05

作者简介: 沈 健(1981-), 男, 江苏南通人, 硕士, 工程师, 从事地下工程、深基坑工程的设计与理论分析。E-mail: Jian_shen@ecadi.com。

Analyses and countermeasures on interaction among large-scale group excavation projects

SHEN Jian

(Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: Yujiabu group excavations cover a huge plan area and meet the problem of interaction among various projects. Different excavation sequences of the group excavations are simulated by means of 3D numerical model. The results show that the superimposed ground settlement occurs among the nearby excavations caused by their excavation, and the distribution of support axial stress is influenced. Some suggestions for excavation sequence and support system and construction control measures are proposed according to the calculated results and analyses.

Key words: group excavation; interaction; 3-D numerical analysis

0 引 言

目前对于相邻基坑开挖相互影响问题的理论研究和实测数据较少, 分析手段少, 难度较大。基坑工程群开挖的安全问题十分重要, 相邻基坑开挖受力模式与基坑工程单独开挖存在着较大的差异, 对支护结构受力以及周边环境的叠加变形受基坑的规模与相互之间的距离所影响, 在基坑支护结构设计中必须针对相邻基坑开挖的相互影响问题, 采取合理的工程措施, 减小相邻基坑工程开挖带来的安全隐患。采用规范方法无法考虑相邻基坑开挖对围护结构受力、变形以及对周边环境的叠加影响。因此需采用三维连续介质有限元方法分析并建立多个基坑支护结构以及一定范围内的土体的三维模型分析此类问题。

1 工程背景

天津于家堡金融起步区一期项目位于天津滨海新区中心商务区的核心地带, 包含中部6地块、西3地

块与北3地块共12个地块。每个地块均设置层地下室, 开挖面积巨大。

如图1所示, 中部6地块基坑整体开挖, 面积达到10万 m^2 , 开挖深度约13.35 m; 西3地块3个基坑开挖深度约13.2 m, 西3地块基坑之间距离约35 m, 与中部6地块基坑距离分别为20~42 m。北3地块挖深约16 m, 与3-14地块之间距离约26 m, 北3地块基坑之间距离约为28~45 m。

中部6地块与其余6个地块共7个基坑拟同步实施, 基坑群开挖对周边环境的影响会产生叠加效应。需预估基坑工程群实施后对周围环境产生的总的影响值。同时基坑群在开挖过程中, 相邻基坑开挖卸载使基坑围护结构承担不平衡的土压力作用, 需要对这种不利的影响进行整体性分析, 确定相邻基坑开挖对围护结构体系受力的影响范围及应对措施。

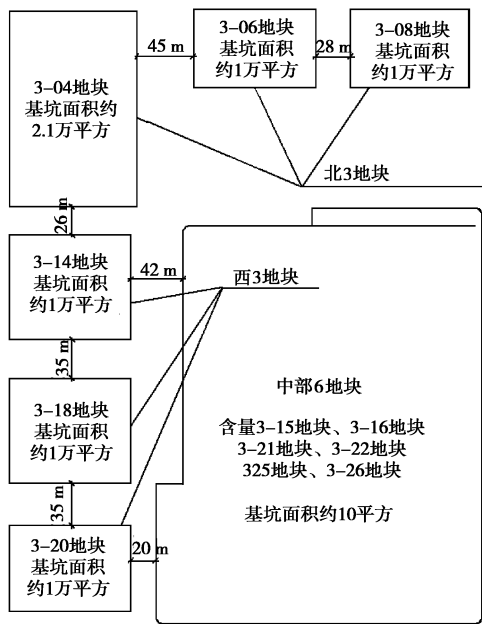


图 1 基坑群平面布置图

Fig. 1 Plan view of group excavations

考虑 3-06 地块与-08 对地快的基坑规模与相互距离与西 3 地块类似，因此三维分析针对 3-04、3-14、3-18、3-20 及中部 6 地块共 5 个基坑的开挖相互影响。

3-04 地块与西 3 地块采用 $\Phi 900$ 钻孔灌注排桩结合三轴水泥土搅拌桩止水帷幕，基坑竖向设置 2 道钢筋混凝土支撑体系，其中 3-04 地块支撑体系布置采用对撑角撑结合边桁架体系，西 3 地块各基坑均采用圆环支撑体系。中部六地块基坑面积达 10 万平方，周边开挖深度约为 13.35 m，总体采用 $\Phi 1100$ 钻孔灌注桩结合三轴水泥土搅拌桩止水帷幕，竖向支撑采用顶部冠梁结合一道钢筋混凝土支撑^[1]。

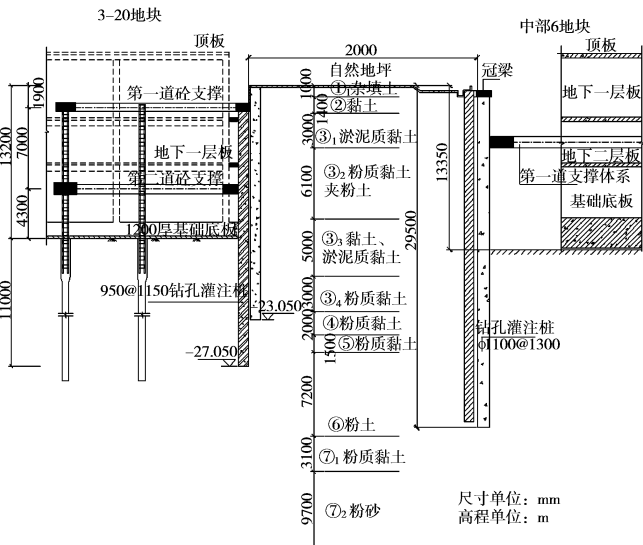


图 2 基坑围护结构剖面图

Fig. 2 Section of retaining structures

场地浅层主要以黏性土为主，且分布有较厚的高含水率、高压缩性极软弱的淤泥质黏土，对基坑支护结构受力较为不利。深层埋藏有较厚的微承压含水层，与基坑基底距离较近的深厚承压含水层，基坑支护结构设计需考虑微承压水对基坑的影响^[1]。

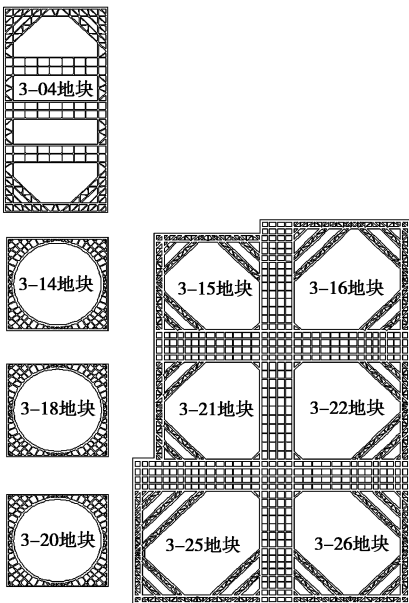


图 3 基坑群支撑平面布置图

Fig. 3 Plan view of strut of group excavations

建设场地基坑围护设计参数如表 1 所示。

表 1 土层物理力学性质表

Table 1 Mechanical parameters of soil layers

土层编号	土层名称	层厚 /m	r /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c	φ
①	杂填土	1.0	18.0	1.0	22.0
②	黏土	1.4	18.8	14.4	10.6
③1	淤泥质黏土	3.0	17.5	9.6	9.4
③2	粉质黏土夹粉土	6.1	18.9	12.2	21.0
③3	黏土淤泥质黏土	5.0	17.9	16.1	11.0
③4	粉质黏土	3.0	19.6	12.3	19.8
④	粉质黏土	2.0	19.8	18.4	14.8
⑤	粉质黏土	1.5	19.4	20.3	17.1
⑥	粉土	7.2	20.2	12.2	27.7
⑦1	粉质黏土	3.1	19.9	16.6	21.4
⑦2	粉砂	9.7	20.4	10.6	31.4

2 基坑群开挖影响的计算分析

2.1 分析模型

为了模拟本工程 3-04 地块、西 3 地块和中部 6 地块基坑开挖的相互影响的空间效应，采用三维连续介质有限元法将多个地块的基坑支护结构、周边一定影响范围内的土体作为整体进行分析，以开挖面上土体地应力的释放作为开挖阶段的荷载，并以单元的“生死”模拟土体的开挖以及支撑的施工，模拟各开挖工况下相邻基坑开挖的相互影响。采用通用有限元计算软件 Abaqus 进行三维建模及分析，整体模型如下图

所示。其中土体采用实体单元模拟，围护桩按抗弯刚度等效为板单元模拟，支撑体系采用梁板单元模拟^[2]。土体主要计算参数如表 1 所示。

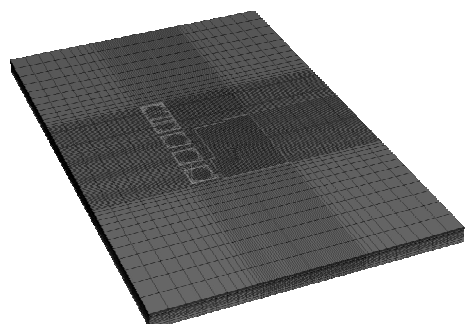


图 4 整体计算模型

Fig. 4 Whole analysis model

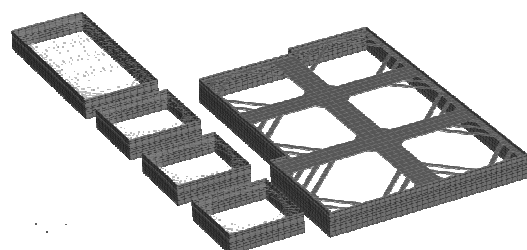


图 5 基坑支护结构计算模型

Fig. 5 Analysis model of retaining structures

2.2 分析工况

为分析本项目多个基坑开挖之间的相互影响，并从计算角度定性分析中部 6 地块基坑与 3-04、西 3 地块基坑开挖的先后顺序对周边环境以及基坑支护结构体系变形及内力的影响规律，选取多种分析工况进行对比计算，以预估多个基坑相互开挖顺序相比单独开挖条件下对基坑支护结构以及支撑体系受力的影响。多种分析工况如图 6 所示。

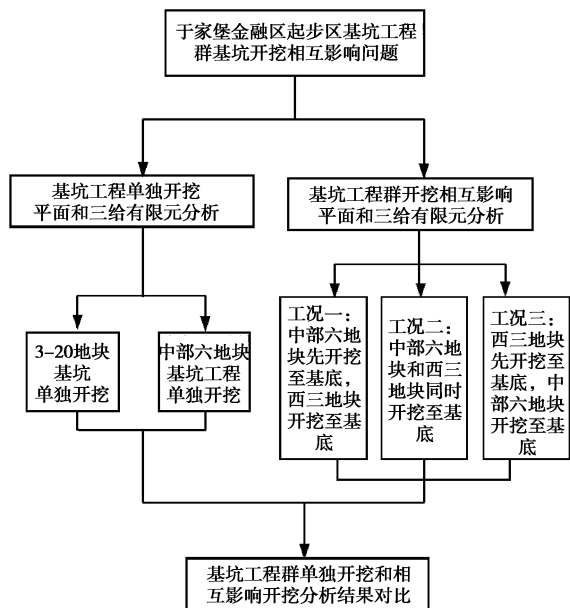


图 6 基坑工程群相互影响的分析思路

Fig. 6 Analysis idea of interaction among group excavations

2.3 单独开挖的分析结果

图 7 为 3-18 地块基坑单独开挖至基底后基坑周边围护结构侧向变形云图，围护体最大侧向位移约为 44 mm。图 8 为 3-18 地块基坑开挖结束后土体竖向变形位移云图，开挖至基底后坑外沉降最大值 21.5 mm。

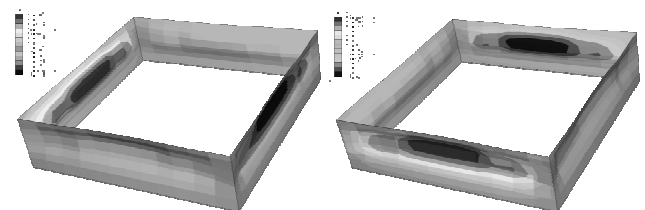


图 7 3-18 地块单独开挖下围护体侧移云图

Fig. 7 Lateral displacement of retaining wall after excavation of 3-18 blocks

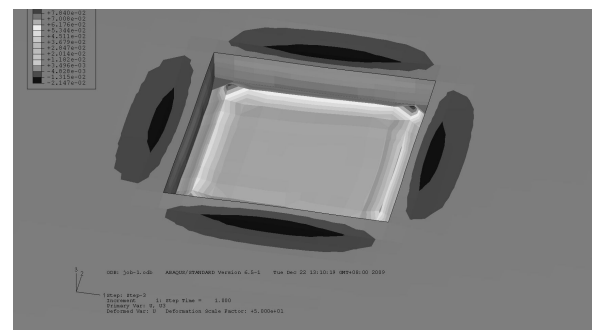


图 8 3-18 地块单独开挖下土体沉降云图

Fig. 8 Settlement of soil after excavation of 3-18 blocks

如图 9 所示中部 6 地块基坑单独开挖过程开挖第一层土方时由于顶部仅设置压顶梁约束，围护体变形呈悬臂状态，顶部变形较大，最大悬臂变形为 35.5 mm，而开挖第二层土方时最大变形发生于开挖面附近，最大侧移约为 76.4 mm。如图 9 所示开挖至基底后，坑外土体最大沉降值为 38 mm。开挖至基底后支撑轴力最大值约为 7400 kN，位于角撑和对撑的位置。对撑和角撑主要承受轴力。最大弯矩为 1077 kN·m，位于周边桁架位置。周边地表最大沉降约为 38 mm。

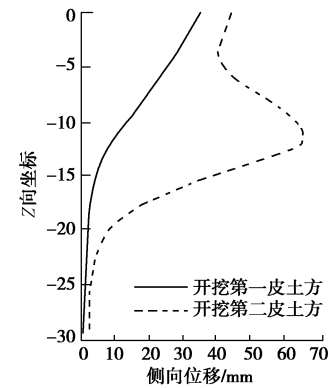


图 9 中部 6 地块单独开挖下围护体侧移曲线

Fig. 9 Lateral displacement curves of retaining wall after excavation of central six blocks

2.4 不同开挖顺序下基坑群开挖的分析结果对比

(1) 围护体变形及坑外沉降结果对比

表 2 围护体变形及地表沉降计算结果汇总

Table 2 Summary of calculated results of retaining wall displacement and soil settlement

	围护体侧移				地表沉降/mm
	左 1 /mm	左 2 /mm	左 3 /mm	左 4 /mm	
3-18 单独	40.1	41.9			20.6
中部六单独			73.3	65.2	38
工况 1	39.9	38.9	72.1	65.4	43.8
工况 2	39.9	39.7	70.3	65.5	42.7
工况 3	40.1	40.5	70.1	65.4	41

从基坑围护结构变形及坑外土体沉降角度，变形数值受先后开挖或同步开挖影响不大，围护体变形总体上在相邻基坑卸荷后，相邻的围护体变形有所减小，而坑外沉降值由于受相邻基坑开挖的叠加影响，基坑外土体在相邻基坑开挖后沉降值增加较大。但最终沉降数值受先后开挖的影响并不大。

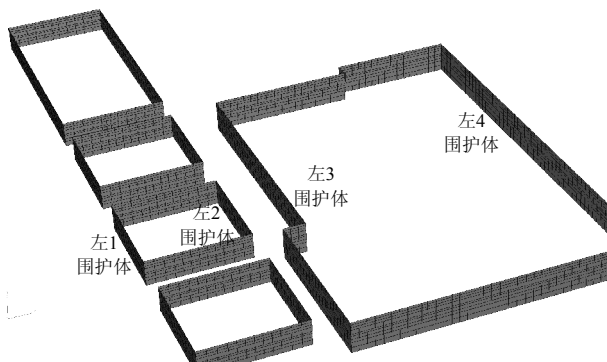


图 10 围护体平面图

Fig. 10 Plan view of retaining walls

对于坑外土体沉降而言，相邻基坑开挖的叠加影响与受基坑之间的距离影响较为明显。3-18 地块与中部六地块之间的距离约为 42 m，基本已在 3 倍开挖深度之外。如图 11 与图 12 所示，3-18 地块与中部 6 地块在各自的基坑主要影响范围内的最终沉降值受先后开挖的影响较小。3-18 地块基坑边的最终沉降均约为 20 mm，中部六地块此区域基坑边的最终沉降约为 32 mm，与单独开挖工况下沉降基本接近。

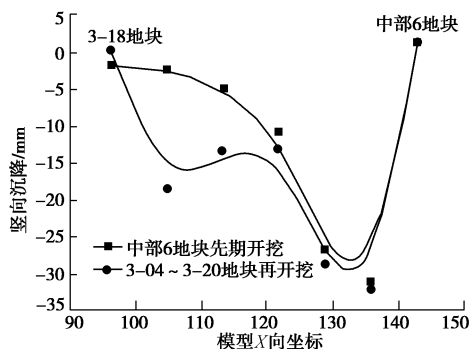


图 11 工况一下 3-18 地块与中部 6 地块之间土体沉降曲线

Fig. 11 Soil settlement adjacent to 3-18 block in analysis mode 1

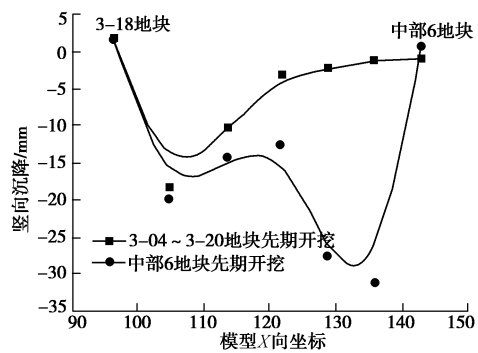


图 12 工况三下 3-18 地块与中部 6 地块之间土体沉降曲线

Fig. 12 Soil settlement adjacent to 3-18 block in analysis mode 3

而 3-20 地块由于与中部 6 地块之间距离仅约为 20 m，因此此区域坑外沉降相比单独开挖工况下叠加效应明显。中部 6 地块单独开挖下此区域沉降约为 25 mm，3-20 地块单独开挖下此区域沉降约为 18 mm，而两个基坑全部开挖完成后，此区域坑外沉降达到 43 mm。因此施工过程中应对此区域的坑外变形尤为关注。

(2) 支撑体系计算结果对比

由支撑轴力对比，中部 6 地块单独开挖后支撑轴力最大值约为 7400 kN，最大弯矩为 1077 kN·m。而左侧各地块开挖卸荷后由西 3 地块基坑均处于中部 6 地块八字撑对应的范围，因此该范围支撑杆件的轴力减小受相邻基坑开挖卸荷后减小较多，在 3-04~3-20 地块开挖结束后，中部 6 地块支撑最大轴力减小为 4483 kN，弯矩减小为 446 kN·m。而中部 6 地块支撑的最终轴力大小受开挖顺序的影响较小。

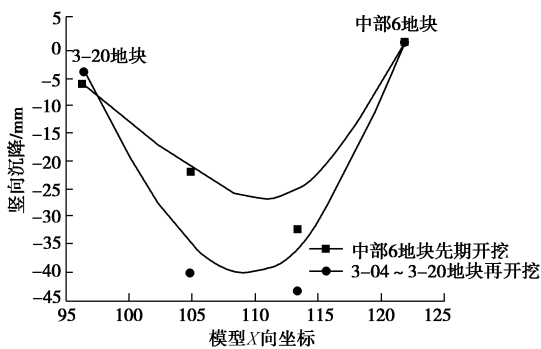


图 13 工况一下 3-20 地块与中部 6 地块之间土体沉降曲线

Fig. 13 Soil settlement adjacent to 3-20 block in analysis mode 1

西 3 地块基坑工程单独开挖后第一道支撑轴力最大值约为 4688 kN，最大弯矩为 596 kN·m。第二道支撑轴力最大值约为 13160 kN，最大弯矩为 1081 kN·m。而中部 6 地块在西 3 地块开挖后第一道支撑轴力最大值约为 4604~4669 kN，最大弯矩为 588~591 kN·m。第二道支撑轴力最大值约为 13070~13130 kN，最大弯矩为 1070~1079 kN·m，中部 6 地块开挖对已经开

挖的西 3 地块支撑内力影响较小。

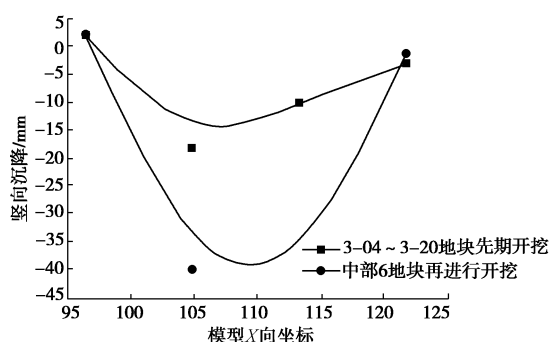


图 14 工况三下 3-20 地块与中部 6 地块之间土体沉降曲线

Fig. 14 Soil settlement adjacent to 3-20 block in analysis mode 3

(3) 设计对策

根据西 3 地块和中部 6 地块基坑开挖相互影响的有限元分析结果, 相邻基坑的开挖对本工程基坑工程围护结构变形、支撑体系受力和周边环境等存在一定的影响。提出针对性的基坑支护结构设计、施工和监测建议措施如下:

(1) 西 3 地块和中部 6 地块施工顺序: 对比不同工况下的有限元分析结果, 中部 6 地块先开挖, 西 3 地块后开挖, 对中部 6 地块的支撑体系最大受力影响较大。由于西 3 地块分为 3 个基坑分别开挖, 基坑面积小, 支撑体系刚度较大, 中部 6 地块后开挖对西 3 地块的支撑体系受力影响较小。结合计算结果, 建议基坑工程群开挖顺序采用工况三: 西 3 地块先开挖至基底, 中部 6 地块再开挖至基底。减小西 3 地块基坑工程开挖对中部 6 地块支护体系的影响。

(2) 加强中部 6 地块支撑体系: 中部 6 地块基坑面积巨大, 接近十万平米, 挖深约为 13.35 m 较深, 采用一道支撑体系。有限元分析结果表明, 中部 6 地块围护结构最大水平变形较大, 相邻基坑开挖对围护结构水平变形产生影响。建议中部 6 地块支撑体系进行封板等加强措施。

(3) 控制基坑工程土方开挖: 西 3 地块均采用两道环形支撑, 基坑工程的土方开挖顺序对环形支撑的受力影响较大。在基坑土方开挖施工过程中, 必须遵循“岛式、分层、分块、对称”开挖的原则^[1], 避免环形支撑的不均匀受力工况产生。对于中部 6 地块的超大面积基坑土方开挖, 必须遵循“盆式、分块、分层、对称”的开挖原则, 靠近相邻地块一侧土方尽可能留土后挖, 尽量减少基坑最不利工况出现的时间, 降低风险。

(4) 控制基坑工程周边环境的影响: 相邻基坑中部

尤其是 3-20 地块区域由于受到两侧距离较近的基坑开挖卸载产生的叠加影响, 基坑周边地表沉降较大。在中部 6 地块和西 3 地块相邻基坑开挖过程中, 需在周边道路和市政管线设置位移、沉降观测点, 并对周边道路的施工车辆运行线路进行合理的安排, 减小基坑周边车辆动荷载对围护结构的影响。

(5) 基坑工程信息化施工: 在基坑工程群的施工过程中, 需加强基坑及环境监测: 包括围护结构水平测斜监测、支撑体系轴力监测, 周边环境系统的地表沉降监测点、深层沉降及土体测斜监测点。各个地块的基坑监测数据应统一分析和处理, 根据整体监测数据及时调整基坑工程施工进度和施工工况, 信息化施工。

3 结 论

天津于家堡工程面临着距离较近的相邻基坑群开挖的相互影响问题, 采用三维数值模型对基坑工程群的开挖相互影响进行分析, 可得到如下结论:

(1) 三维数值分析模型按实际基坑规模与距离考虑基坑群的围护结构、基坑周边一定影响范围内的土体, 是分析基坑群和相邻基坑开挖相互影响较为理想的方法。

(2) 基坑工程群开挖对抗外环境、围护结构受力分布等均存在一定的影响。需在设计过程中结合计算结果对围护结构进行相应的加强; 对相邻基坑之间重点影响的区域需结合环境条件采取相应的施工控制措施并预备应急预案。

(3) 应结合计算结果采取有效的施工以及监控措施, 主要为合理的土方开挖顺序、各个基坑的土方开挖原则、同时施工过程中应结合各个基坑的监测数据变化及时调整基坑工程施工进度和施工工况。

参考文献:

- [1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. Beijing China. Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese))
- [2] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊): 251 - 255. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WENG Qi-ping. Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(S0): 251 - 255. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)