

某大型深基坑的优化设计研究

姜 燕^{1, 2}, 杨光华^{1, 2}, 乔有梁^{1, 2}, 钟志辉³, 张玉成^{1, 2}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510641; 2. 广东省岩土工程技术研究中心, 广东 广州 510641;
3. 武汉大学土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 通过典型案例, 对事故基坑的设计进行了优化, 根据土体模量控制位移、土体的 c 、 φ 值控制土压力的原理来实现开挖后回填的基坑内外侧土体不相一致的情况, 并采用深基坑开挖支护结构计算程序对典型剖面进行了计算, 将计算结果与传统方法、有限元方法相比较, 说明了优化方案的可靠性。该计算方法可供同类工程参考。

关键词: 深基坑; 优化设计; 坍塌

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0335-07

作者简介: 姜 燕(1986-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事岩土力学与地基方面研究的工作。E-mail: benbenjiangyan@163.com。

Optimal design of a large deep excavation

JIANG Yan^{1, 2}, YANG Guang-hua^{1, 2}, QIAO You-liang^{1, 2}, ZHONG Zhi-hui³, ZHANG Yu-cheng^{1, 2}

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510610, China; 2. The Geotechnical Engineering Technology Center of Guangdong Province, Guangzhou 510641, China; 3. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on a typical case, the optimal design for the collapsed excavations is performed. The principle of the optimal design is that the displacement is controlled according to the modulus of soil, while the soil pressure is controlled according to the cohesion and friction of soil. Based on this principle, the problem that the soil pressure inside and outside the pit are unequal after backfilling is addressed. Moreover, the typical sections of the pit are calculated by the software for supporting structures of deep excavations. The calculated results are compared with those by the traditional methods and the finite element method, which proves the reliability of the optimal design. The proposed method will give guidance for other similar projects.

Key words: deep excavation; optimal design; collapse

0 引言

如果说 20 世纪是高楼大厦的世纪, 21 世纪将是地下工程的世纪。随着我国城市化进程的加快, 城市地下空间作为一种资源受到越来越多的重视和开发, 深基坑工程技术还必将进一步发展, 上海浦东的金茂大厦, 基坑支护采用地下连续墙, 深度 36 m, 总长 568.4 m; 国家体育场(鸟巢)基坑开挖深度超过了 30 m; 上海徐家汇地铁车站作为亚洲最大的地铁车站, 开挖深度 23 m, 长度 660 m; 上海中心工程, 建筑物高度 632 m, 基坑深度远超过 50 m 等等^[1]。基坑工程作为一个古老而又常新的研究课题, 不仅存在安全和稳定的问题, 而且还存在因为土方开挖而引起周围地层变形甚至危及相邻建筑物、市政管网的正常使用问题, 基坑支护的事故往往损失重大, 对于事故基坑的再设计更要慎之又慎。而对于事故基坑, 目前大

多数仍然采用旧的地质钻孔简化成平面进行计算, 且考虑到基坑发生过事故, 设计往往过于保守。事故基坑进行处理后地质情况往往发生了较大变化, 应根据实际情况进行处理。

本文通过典型案例, 对事故基坑的再设计进行优化, 由于开挖后发生坍塌的基坑重新进行过回填压实, 故坑内外土体不相一致, 需考虑坑内土体的变化。根据土体模量控制位移、土体的 c 、 φ 值控制土压力的原理, 本文采用深基坑开挖支护结构计算程序^[2]来实现基坑内外侧土体不相一致的情况, 并将计算结果与传统方法、有限元方法相比较, 说明了优化方案的可靠性, 该计算方法可供同类工程参考。

1 工程概况

某工程基坑东西向最大长度约 111 m, 南北向最大长度约 71 m, 基坑深度从现地面算起, 最大处约 20.3 m, 基坑设计安全等级为一级。

1.1 周边环境

拟建场地目前基本为一平地, 基坑西面是一河涌, 涌宽 22 m, 涌深约 6 m, 护岸为毛石砌筑, 距离基坑边约 6~7 m; 河涌以西为数栋 8 层高建筑物, 距离坑边约 42 m。基坑北侧为过水箱涵, 箱涵宽 22 m, 深 6~7 m, 距离基坑边约 6 m; 基坑东侧为道路, 路边离坑边约 5 m; 基坑南侧有二栋建筑, 基础分别为冲孔灌注桩(桩长约 17~24 m)、锤击灌注桩(以强风化及以上强度的岩层为持力层), 距离坑边最近点约为 18 m。基坑周边情况见图 1。

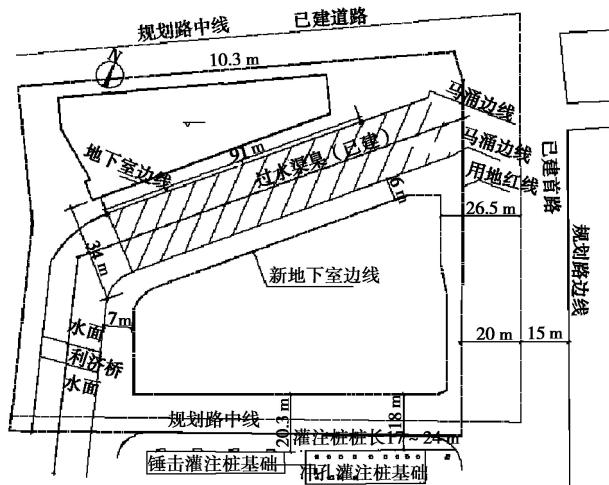


图 1 基坑周边情况示意图

Fig. 1 Schematic diagram of circumstances around excavation

1.2 工程地质情况

根据钻孔揭露, 场地岩土层自上而下划分为人工填土层、杂填土层、淤泥质土层、粉质黏土层、强风化及中风化层。岩土层主要设计参数建议值见表 1, 各层标贯试验统计表见表 2。

表 1 岩土层主要设计参数建议值表

Table 1 Main suggested parameters of soils

岩土层 名称	天然密度 ρ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	凝聚 力 c $/(\text{kPa})$	内摩擦 角 φ $(^\circ)$	压缩模量 E_s $/(\text{MPa})$	变形模 量 E_0 $/(\text{MPa})$	地基承 载力特 征值 f_{ak} $/(\text{kPa})$
素填土	1.78	14	9.7	2.7	3.5	80
杂填土	1.85	15	10			
淤泥质土	1.67	4.6	3.6	5.9	2	60
粉质黏土	1.69	7.6	3.7	2.4	6	160
强风化岩	2.00	80	25		140	600
中风化岩					2000	1300

表 2 各层标贯试验统计表

Table 2 Statistical data of SPT of soil layers

土名	标 贯 次 数	实测值			修正值		
		最 小 值	最 大 值	平均 值	最 小 值	最 大 值	平均 值
素填土	2	6	10	8	5.6	8.7	7.2
淤泥质土	5	2	3	2.4	1.8	2.7	2.1
粉质黏土	5	13	15	13.8	10.7	12.7	11.5
强风化岩	9	50	59	54.9	41.2	48.4	44.1

1.3 历史概况

本工程基坑南侧曾经发生倒塌, 最深处约达 19 m。事故发生后, 基坑采取了回填处理, 设计方对基坑进行了重新设计: 基坑周边采用 $\Phi 1400 @ 1600$ 的人工挖孔(冲孔)灌注桩+三道混凝土内撑, 南北向混凝土内撑截面为 $1.2 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$, 并在基坑南侧每道腰梁处设一排预应力锚索, 在灌注桩间加做 $\Phi 600$ 的旋喷桩止水。

经校核计算, 新的支护体系较为安全, 但设计时并未考虑基坑南侧坍塌之后, 坑内外侧土体不相一致的情况, 也未考虑南北侧存在不平衡土压力的情况, 故设计时的边界条件与实际有一定出入, 本文结合以上提出的问题, 同时考虑基坑内外侧土体不一致及不平衡土压力, 对基坑支护体系进行优化设计。

由于其事故范围发生在基坑南侧, 故选取基坑南北侧典型钻孔进行优化计算。典型地质钻孔见图 2, 原设计基坑支护剖面见图 3。

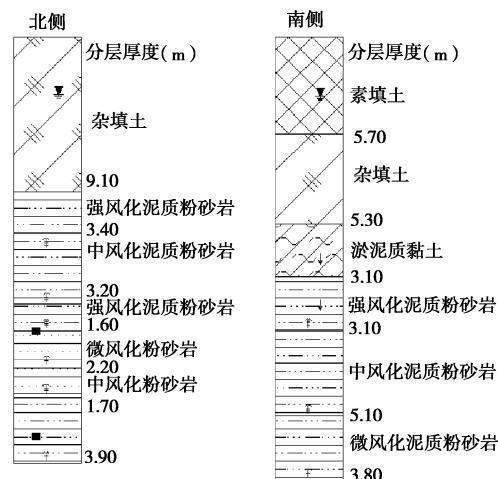


图 2 基坑南北侧典型地质剖面图

Fig. 2 Typical geological sections of south and north sides of excavation

2 优化计算

设计方选择了安全性较高的支护形式, 本文经过

重新计算, 认为具有优化空间。

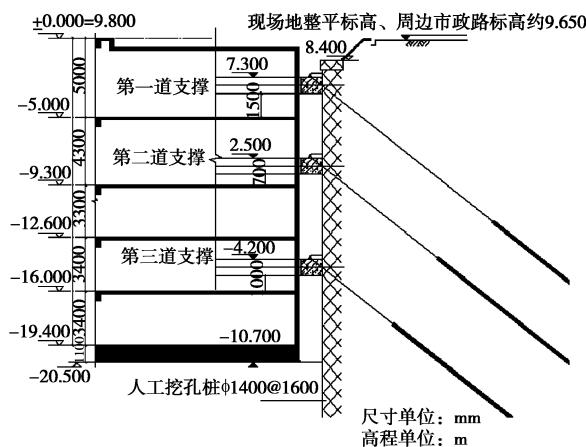


图 3 原设计基坑支护剖面图

Fig. 3 Original design section of excavation

2.1 优化思路

施工场地虽接近平地, 但基坑南侧曾发生过坍塌, 且南北侧地质条件有差异, 北侧有过水箱涵, 因此基坑的南侧与北侧存在着土压力不平衡问题。故设计方在基坑南侧每道腰梁处设一排预应力锚索, 来平衡基坑不对称的土压力。

但基坑南侧有两栋建筑物, 距离基坑边最近点约为 18 m, 发生坍塌事故时, 建筑物基础曾经受过扰动, 产生了一定的水平位移, 而在基坑南侧设预应力锚索势必会进一步扰动基坑边建筑物的基础, 尤其是较早的锤击灌注桩基础, 从而导致周边建筑物产生进一步的水平位移及沉降, 影响建筑物的安全。且基坑在倒塌之后进行了回填压实, 基坑内侧土体发生了变化, 与外侧土体不相一致, 通过新的重型触探试验数据发现内侧填土相对较好, 鉴于以上种种变化, 本文通过重新复核计算, 认为在新的地质资料下取消锚索, 位移、轴力、弯矩等均可满足规范及设计要求, 为慎重起见和相互对比, 以下分别采用杨光华教授编著的深基坑支护软件、理正深基坑软件及有限元软件校核该优化方案的可行性。

此外, 基坑南侧的锤击建筑物基础作用深度如按强风化岩面约 8 m 计算, 基础荷载按 45° 向下扩散, 则其影响深度也已超出基坑开挖深度, 且基坑外侧土体很快到达岩面, 对基坑产生的影响很小, 故在本次计算分析是不考虑建筑物基础荷载的影响。具体受力简图如图 4。

2.2 参数选取及荷载考虑

根据地质勘探资料及重型动力触探试验结果, 结合广东省岩土体特性和经验值确定基坑支护设计岩土参数建议值, 具体见表 3。

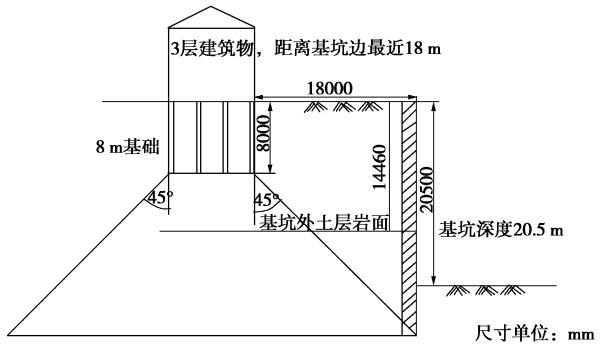


图 4 建筑物基础荷载扩散示意图

Fig. 4 Schematic diagram of diffusion of foundation loads

表 3 计算参数取值表

Table 3 Parameters for computation

地层名称	抗剪强度		重度 /(kN·m ³)
	凝聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	
素填土	12	14	18
杂填土	12	14	18.5
淤泥质土	6	6	17
粉质黏土	20	16	18
强风化	60	24	20
中风化	100	26	22

(1) 基坑回填的考虑

在杨光华教授编著的深基坑支护计算软件中, 基坑内侧土体模量控制位移(增量法中土的位移为 $\Delta = -d \cdot q(1 - \mu^2) \cdot \omega / E_0$, 与 E_0 有关, 参见文献[2]), 外侧土体的 c 、 φ 值控制土压力(增量法中采用了新的土压力公式, 与 c 、 φ 有关, 具体参见文献[2]), 故可根据此原理考虑基坑塌方后重新回填土固结, 从而导致基坑内外侧土体不一致的情况, 这是其他计算软件所不能考虑的。其中参数及荷载情况主要考虑如下:

a) 坑内土体由于在塌方后进行了回填固结, 根据重型动力触探试验结果进行统计, 计算时内侧土体变形模量取值为:

0~5.0 m: $E=25$ MPa (平均击数约 12 击)

5~10.0 m: $E=50$ MPa (平均击数约 26 击)

10~19.0 m: $E=80$ MPa (平均击数约 40 击)

b) 考虑填土荷载及车辆荷载, 超载取 40 kPa。

(2) 不平衡土压力的考虑

由于南北侧地质条件有差异, 基坑北侧有过水箱涵, 考虑到南侧土压力较大, 有可能导致北侧支护结构往基坑外侧产生位移, 故支撑刚度计算时采用支撑全长进行计算。

2.3 深基坑支护软件计算结果

首先采用同一刚度对南北侧分别进行计算, 再将南北侧计算的支撑轴力差单独施于北侧计算, 具体计算结果如下。

(1) 南侧计算结果

计算剖面及包络图分别见图5~7。

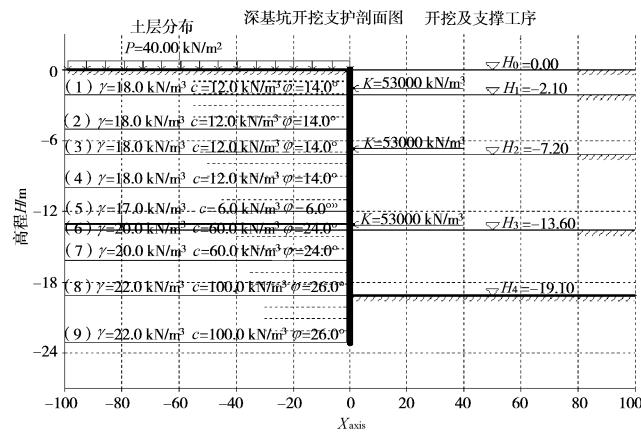


图5 南侧计算剖面

Fig. 5 Computation section of south side

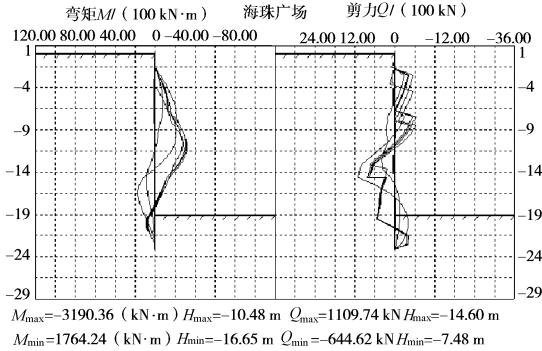


图6 南侧弯矩剪力包络图

Fig. 6 Envelope diagrams of moment and shear force (south side)

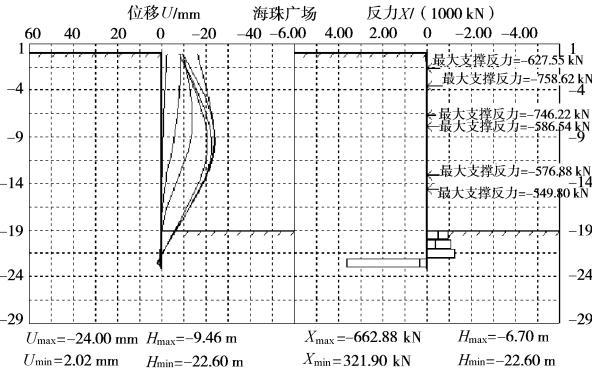


图7 南侧位移包络图

Fig. 7 Envelope diagrams of displacement (south side)

由以上计算结果可知, 计算宽度取1.6 m时, 南侧弯矩最大值为3190.36 (kN·m), 最大支撑轴力746.22 kN, 位移最大值为24.0 mm, 往基坑内侧产生位移。考虑分项系数及重要性系数, 经计算, 桩身配筋、支撑截面和配筋均满足设计要求。

(2) 北侧计算结果(不考虑南北轴力差)

计算剖面及包络图分别见图8~10。

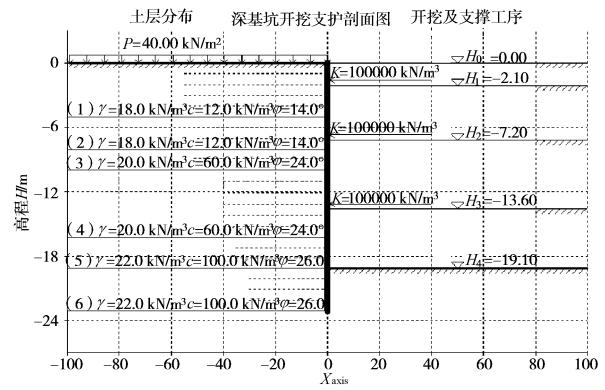


图8 北侧计算剖面

Fig. 8 Computation section of north side

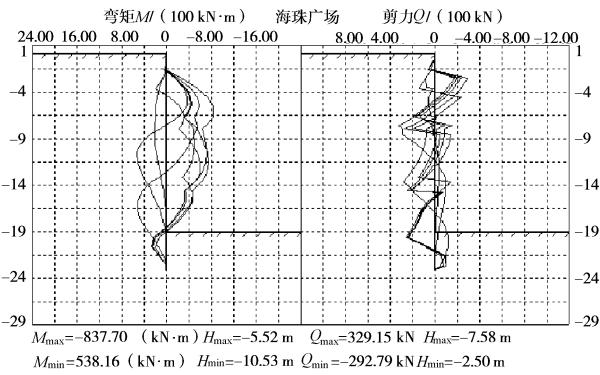


图9 北侧弯矩剪力包络图

Fig. 9 Envelope diagrams of moment and shear force (north side)

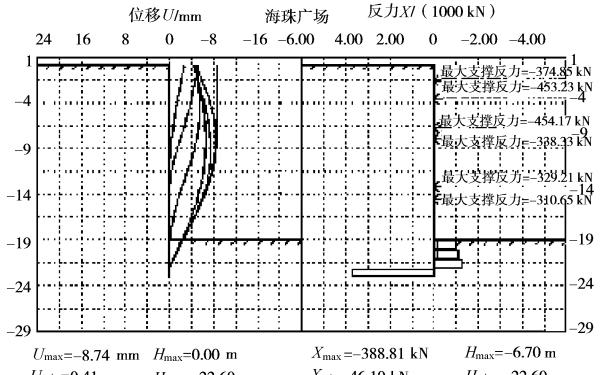


图10 北侧位移包络图

Fig. 10 Envelope diagrams of displacement (north side)

由以上计算结果可知, 计算宽度取1.6 m时, 北侧弯矩837.7 (kN·m), 最大支撑轴力454.2 kN, 位移8.74 mm, 考虑分项系数及重要性系数, 经计算, 桩身配筋、支撑截面和配筋均满足设计要求。

(3) 北侧计算结果(考虑南北轴力差)

由深基坑支护软件计算出南北侧轴力差 ΔP , 施加与北侧单独计算, 其轴力差结果见表4。包络图见图11~12。

表 4 南北对撑轴力差

Table 4 Unbalanced axial forces of south and north sections

施工步	位置	一道撑 轴力值 /kN	二道撑 轴力值 /kN	三道撑 轴力值 /kN
开挖一	南	—	—	—
	北	—	—	—
开挖二、施加 1道撑	南	357.65	—	—
	北	252.80	—	—
	差值	104.85	—	—
开挖三、施加 2道撑	南	506.17	374.45	—
	北	311.42	263.06	—
	差值	194.75	111.39	—
开挖四、施加 3道撑	南	515.77	652.25	562.90
	北	299.49	388.81	329.21
	差值	216.28	263.44	233.69

弯矩 M (100 kN·m) 海珠广场 剪力 Q (100 kN)

 $M_{max} = -640.27 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$ $H_{max} = -13.10 \text{ m}$ $Q_{max} = 326.37 \text{ kN}$ $H_{min} = -7.58 \text{ m}$
 $M_{min} = 520.09 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$ $H_{min} = -10.53 \text{ m}$ $Q_{min} = -259.81 \text{ kN}$ $H_{max} = -2.50 \text{ m}$

图 11 弯矩剪力包络图

Fig. 11 Envelope diagrams of moment and shear force

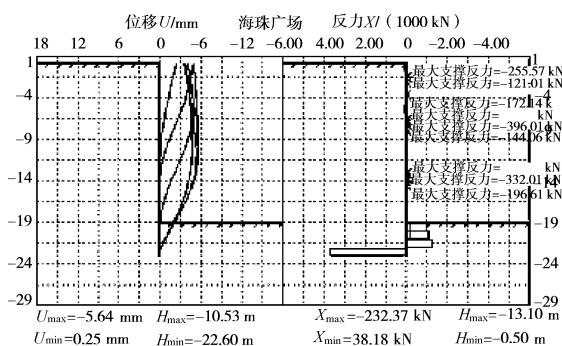


图 12 位移包络图

Fig. 12 Envelope diagrams of displacement

经计算, 考虑南北侧土压力不均匀时, 将南北侧支承轴力差施加于北侧, 北侧弯矩最大值为 640.27 (kN·m), 位移最大值为 5.64 mm。

2.4 理正软件计算结果

(1) 南侧计算结果

内力位移包络图如图 13。

由以上计算结果可以看出, 南侧最大位移为 31.55 mm, 基本满足要求, 由于理正软件不能考虑基坑内

外土层不一致的情况, 而实际内侧上部填土质量好于基坑外侧, 故其实际位移应小于此值。桩身最大弯矩为 3355.28 (kN·m), 支撑最大轴力为 8332.38 kN, 经过配筋验算, 桩身配筋及支撑截面配筋均满足设计要求。

(2) 北侧计算结果

内力位移包络图如图 14。

由以上计算结果可以看出, 南侧最大位移为 7.93 mm, 满足要求。桩身最大弯矩为 785.74 (kN·m), 支撑最大轴力为 4273.25 kN, 经过配筋验算, 桩身配筋及支撑截面配筋均满足设计要求。

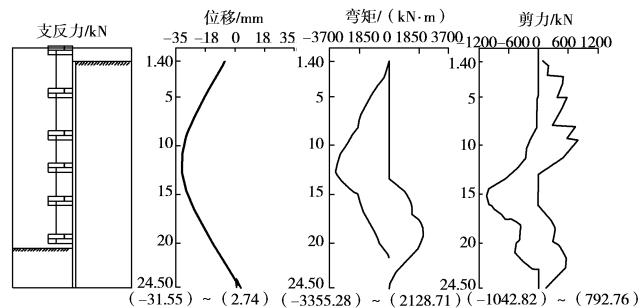


图 13 南侧内力位移包络图

Fig. 13 Envelope diagrams of internal force and displacement (south side)

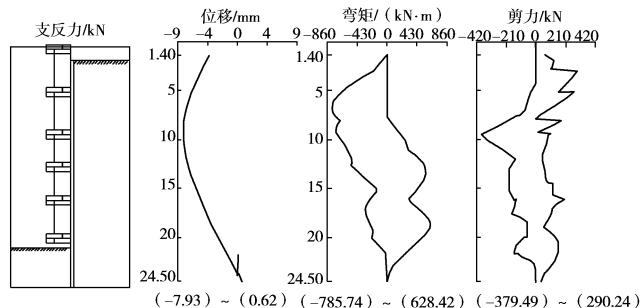


图 14 北侧内力位移包络图

Fig. 14 Envelope diagrams of internal force and displacement (north side)

2.5 有限元计算结果

采用有限元计算时为单位宽度计算, 设计采用冲孔桩 $\phi 1400@1600$, 故采用单位宽度内刚度相等的原则进行等效, 计算单位宽度下的桩径, 由此得单位计算宽度下的等效桩径为 1.245 m, 同理单位宽度等效支撑截面, 基坑北侧考虑深 6 m, 宽 22 m 的箱涵。模型采用四边形单元, 单元数共 4648 个, 节点数 5816 个, 岩土体采用莫尔-库仑模型, 桩与支撑采用弹性模型, 模型左右施加法向约束, 底部施加固定约束, 上部为自由边界, 基坑两侧各施加超载 40 kPa, 南北

侧地层情况见图3, 具体岩土体材料参数见表3。模型及计算结果见图15~19。

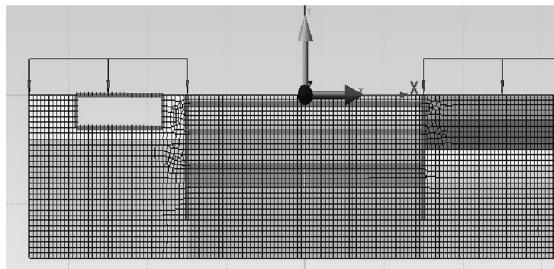


图 15 整体有限元模型

Fig. 15 FEM model

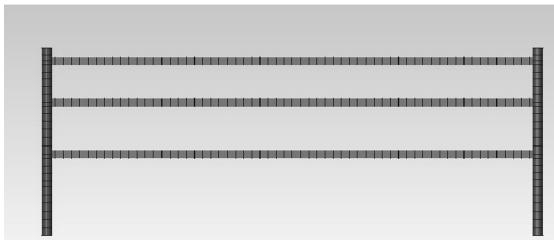


图 16 桩与支撑局部模型

Fig. 16 Local model of piles and bracings

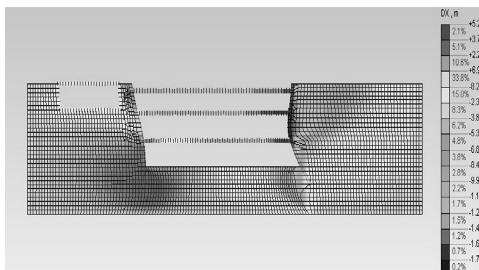


图 17 开挖至基坑底的水平位移

Fig. 17 Horizontal displacement after excavation to pit bottom



图 18 开挖至基坑底的支撑轴力

Fig. 18 Axial forces of bracings after excavation to pit bottom

由以上结果可以看出, 开挖至基坑底时, 基坑南侧最大位移为1.90 cm, 北侧上部土体朝向基坑外产生位移, 最大值约为-9.65 mm, 基坑中部及下部朝向基坑内产生位移, 最大值约为4.75 mm。单位宽度的支承轴力最大值发生在第二道撑, 其值约为453.8 kN, 桩身弯矩最大值约为1005 (kN·m)。具体分步计算结果见表5。



图 19 开挖至基坑底的桩身弯矩

Fig. 19 Moment of piles after excavation to pit bottom

表 5 南北对撑剖面有限元结果

Table 5 Results of south and north sections by FEM

施工步	位 置	位移最大 值/mm	一道 撑轴 力值 /kN	二道 撑轴 力值 /kN	三道 撑轴 力值 /kN	桩身弯矩 最大值 /(kN·m)
开	南	3.32	83.6	—	—	509.6
挖1	北	-0.4/0.78	83.6	—	—	—
开	南	9.10	218.8	124.8	—	506.2
挖2	北	-1.66/2.52	218.8	124.8	—	—
开	南	14.5	263.8	372.7	256.6	703.9
挖3	北	-6.82/4.02	263.8	372.7	256.6	559.5
开	南	16.8	253.8	414.6	380.8	812.5
挖4	北	-7.84/4.85	253.8	414.6	380.8	653.2
开	南	19.0	263.6	453.8	442.3	1005.0
挖5	北	-9.65/4.75	263.6	453.8	442.3	533.0

经计算, 考虑1.6的计算宽度、分项系数及重要性系数, 设计配筋时支护桩桩身弯矩取2211 (kN·m), 支撑轴力取11231.55 kN, 经计算, 桩身配筋、支撑截面和配筋同样满足要求。

3 结 论

综合深基坑支护计算软件、有限元(midas)软件及理正深基坑支护软件三种方法的结果, 取消南侧预应力锚索后的计算结果汇总见表6。三种方法结果均为1.6 m计算宽度结果, 图中位移负值表示朝向基坑外侧产生位移。

表 6 三种方法计算结果汇总

Table 6 Results by different methods

钻孔	方法	最大 位移 /mm	最大 身弯矩 计算值 /(kN·m)	最大支 撑轴力 计算值 /kN	桩身及支撑 截面配筋满 足情况
南侧 钻孔	深基坑软件	24.0	3190.36	8394.98	满足
	理正软件	31.55	3355.28	8332.38	满足
	有限元	19.0	1608.0	8168.4	满足
北侧 钻孔	深基坑软件	8.74	837.7	5450.4	满足
	深基坑软件 (施加轴力差)	5.64	640.27	7128.0	满足
	理正软件	7.93	785.74	4273.25	满足
	有限元	-9.65	1045.1	8168.4	满足

由以上统计结果可以看出, 在新的地质勘探结果的基础上, 取消原有设计中基坑南侧的预应力锚索是

安全可行的, 通过分析, 可得如下结论。

(1) 三种计算方法的位移、支撑及轴力结果比较接近, 说明计算结果是可靠的。

(2) 根据原设计中的桩身配筋和支撑截面配筋进行验算, 进行优化后基坑支护结构的强度满足要求。

(3) 对于开挖后坍塌的基坑重新回填后, 坑内外土体不相一致的情况, 深基坑开挖支护结构计算程序中可通过土体模量控制位移、坑外土体的 c 、 φ 值控制土压力的原理来实现。

(4) 支护结构通过优化后安全系数有保证, 且节约造价, 有经济效益。

参考文献:

- [1] 马志创. 不对称超载作用下基坑内力与变形分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2010. (MA Zhi-Chuang, Study on endogenous force and deformation of foundation pit under asymmetric overload[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2010. (in Chinese))
- [2] 杨光华. 深基坑支护结构的实用计算方法及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2005. (YANG Gang-huang, The practical calculation method and application on the structure of retaining of building foundation excavation[M]. Beijing: The Geological Publishing House, 2005. (in Chinese))

(本文责编 明经平)