

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.06.033

基于杆系有限元法板式挡土结构内力 位移的影响分析

石晓燕, 贺永胜, 王启睿, 张跃飞

(军事科学院 国防工程研究院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 依据上海某深基坑工程, 基于杆系有限元法, 分别讨论每道支撑位置、挡土结构厚度及其入土深度对板式挡土结构内力、位移的影响。结果表明: 对于多道支撑的挡土结构, 支撑越接近开挖面对板式挡土结构内力的影响越大, 只需把最接近开挖面的两道支撑位置作为板式挡土结构的优化变量; 在保证稳定性的前提下, 挡土结构的厚度对内力位移影响显著, 而入土深度影响较小, 因此, 挡土结构的厚度可作为板式挡土结构的优化变量, 入土深度满足验算要求即可。满足支护功能并考虑工程经济性, 为板式挡土结构提供参考依据。

关键词: 杆系有限元法; 板式挡土结构; 内力; 位移

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)06—0188—06

Influence Analysis with Internal Force and Displacement of Slab Retaining Structure Based on Rod Finite Element Method

SHI Xiaoyan, HE Yongsheng, WANG Qirui, ZHANG Yuefei

(Institute of Defense Engineering, AMS, PLA, Luoyang, He'nan 471023, China)

Abstract: According to the deep foundation pit project in Shanghai, based on the rod finite element method, this paper discusses the influence of each supporting position, thickness and depth on internal force and displacement. It turns out that, for the multi-channel retaining structure, the closer support position to the excavation, the greater influence with the internal force of slab retaining structure, so the two closest excavated surface channel support position should be used as optimal variable. On the promise of ensuring stability, the thickness of retaining structure has significant influence on internal force and less influence on soil depth, therefore, the thickness of retaining structure can be used as the optimum variable. This result can satisfy the support function and meet the economical requirements. This paper can provide reference for the slab retaining structure.

Keywords: rod finite element method; slab retaining structure; internal force; displacement

目前, 城镇化发展使得地面空间的利用愈发紧张, 各大高层住宅与商业楼地基要求较高, 也就涉及到了深大基坑问题^[1-4]。影响基坑工程的因素较多, 如建设场地环境、施工技术、岩土性状的力学因素等, 在选择基坑支护方案时应多方面考虑择优选用, 当已选定了结构支护方案后, 结构细部的设计因素对基坑工程的制约也相当重要, 且现行支护方案较多, 增大了研究难度。本文仅对板式挡土结构细

部因素进行分析, 以期为基础支护结构方案提供参考。

国内外专家学者采用定性方法^[5-9]和定性定量相结合的方法优化基坑支护方案, 郭方胜^[10]和朱彦鹏等^[11]采用层次分析法优选深基坑支护方案, 确保优选过程的全面性、科学性、公正性以及准确性。段绍伟等^[12]认为目前基坑支护结构选型缺乏科学依据, 凭工程经验判定的支护方法存在很大问题, 依据

收稿日期: 2019-08-14

修稿日期: 2019-09-17

作者简介: 石晓燕(1989—), 女, 河南洛阳人, 硕士, 主要从事岩土工程设计与科研工作。E-mail: 734511849@qq.com

非结构性决策模糊法分析基坑支护工程的主要参数,研究了工程可靠度、工程造价、工期对基坑支护结构选型的影响。张信贵等^[13]基于系统优化理论对整个支护系统划分了相应的研究层次,编制了深基坑支护系统优化分析程序。陶莉^[14]根据基坑工程支护的特点构建了基坑支护方案优选的评价指标体系,阐述了各指标所包含的内容。李菽兵^[15]利用模糊数学理论对基坑支护方案进行优化优化,采用专家调查法和层次分析法确定每个影响因素对支护的影响程度。肖武权等^[16]对深基坑支护方案及所选支护类型细部结构两个方面进行计算,确定决策变量、目标函数、约束条件和优化算法来优选支护方案。

1 工程概况

上海某轨道交通工程,车站长 158.8 m,宽 18.4 m。车站标准段开挖深度约 17.7 m,采用厚度为 800 mm 的地下连续墙围护结构,墙长度为 34.7 m,计算时考虑地面超载 20 kPa。总共设六道支撑,如图 1 所示,第一道支撑为截面 800 mm × 800 mm 钢筋混凝土支撑,其余支撑均为 $\Phi 609 \times 16$ mm 钢管撑,支撑刚度由程序自动计算得到。本次计算采用同济启明星开发的 FRWS4.0 程序,软件依据 M 法编制,能够考虑施工开挖、支撑的过程,土压力采用水土分算。

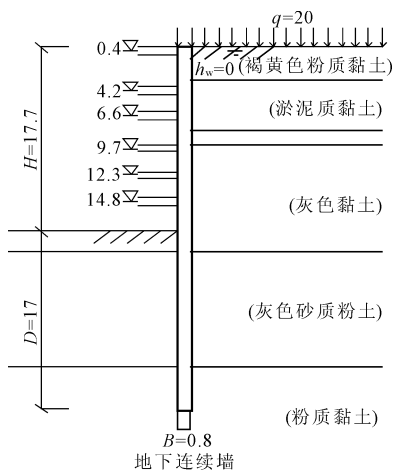


图 1 杆系有限元法计算简图

1.1 工程地质

本车站地基土在 60.0 m 深度范围内均为第四纪松散沉积物,属第四系滨海平原古河道地基土沉积层,主要由饱和黏性土、粉土等组成,具有成层分布特点。根据地勘报告,土层的物理力学指标参见表 1。

表 1 土层的物理力学指标

土层	层底标高/m	层厚/m	重度 /(kN·m ⁻³)	φ /(°)	c /kPa	M /(kN·m ⁻⁴)
褐黄色粉质黏土	-3.2	3.2	18.5	29.5	6	8000
淤泥质黏土	-7.9	4.7	18.3	18.3	16	6468
淤泥质黏土	-9.5	1.6	17.9	24.5	10	5000
灰色黏土	-19.7	10.2	17.1	12.5	13	3330
灰色砂质粉土	-30.6	10.9	18.1	25.8	39	8000
粉质黏土	-38.7	8.1	18.2	30.5	40	9000
砂质黏土	-47.1	8.4	17.8	23.5	11	9795

1.2 施工工况

开挖、支护共分成 13 个步骤进行:第一步为基坑开挖至 -1.5 m,在 -0.4 m 设置第一道钢筋混凝土支撑;第二步为基坑开挖至 -4.6 m,在 -4.2 m 处设置第二道钢支撑;第三步为基坑开挖至 -7.4 m,在 -7.1 m 处设置第三道钢支撑;第四步为基坑开挖至 -10 m,在 -9.7 m 处设置第四道钢支撑;第五步为基坑开挖至 -12.6 m,在 -12.3 m 处设置第五道钢支撑;第六步为基坑开挖至 -15.1 m,在 -14.8 m 处设置第六道钢支撑;第七步开挖至基坑底部 -17.4 m,开挖、支撑过程见表 2。

表 2 开挖的支撑工况

工况编号	工况类型	深度 /m	支撑刚度 /(MN·m ⁻²)	支撑 编号	预加轴力 /(kN·m ⁻¹)
1	开挖	1.5	—	—	—
2	加撑	0.4	285.71	1	0
3	开挖	4.6	—	—	—
4	加撑	4.2	177.43	2	0
5	开挖	7.4	—	—	—
6	加撑	7.1	177.43	3	0
7	开挖	10.0	—	—	—
8	加撑	9.7	177.43	4	0
9	开挖	12.6	—	—	—
10	加撑	12.3	177.43	5	0
11	开挖	15.1	—	—	—
12	加撑	14.8	177.43	6	0
13	开挖	17.4	—	—	—

2 杆系有限单元法

把挡土结构的各个组成部分,根据其结构受力特性,假设成杆系有限单元,沿竖向划分为有限个单元,一般每隔 1 m ~ 2 m 划分一个单元,各单元以边界上的节点相连接,见图 2。挡土结构的节点应满足变形协调条件,即结构节点的位移和联接在同一

节点的每个单元的位移是相互协调的,并取节点的位移为基本未知量。单元所受荷载和单元节点位移之间的关系,以单元的劲度矩阵 $[K]^e$ 来确定,即:

$$\{F\}^e = [K]^e \{\delta\}^e \quad (1)$$

式中: $\{F\}^e$ 为单元节点力; $\{\delta\}^e$ 为单元节点位移; $[K]^e$ 为单元劲度矩阵。单元劲度矩阵经矩阵变换后,集成总劲度矩阵。最后根据静力平衡条件,求得挡土结构的内力和位移。

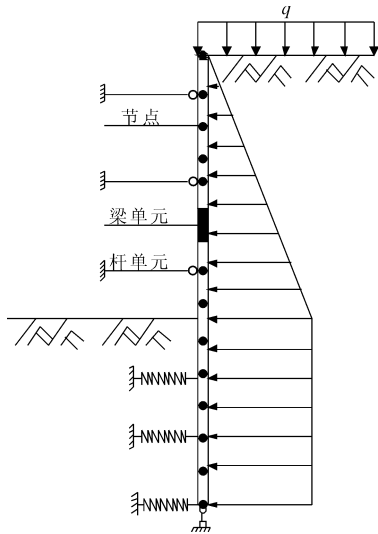


图 2 杆系有限元计算简图

将每道支撑结构视为梁单元,取梁轴线为 x 轴如图 3 所示,可写出梁单元的劲度矩阵表达式(2)及单元劲度矩阵式(3):

$$\begin{Bmatrix} X_i \\ Y_i \\ M_i \\ X_j \\ Y_j \\ M_j \end{Bmatrix} = \frac{EI}{l} \begin{bmatrix} A/J & & & & & \\ & 12/l^2 & & & & \\ & 0 & 6/l & & & \\ & 0 & 6/l & 4 & & \\ -A/J & 0 & 0 & A/J & & \\ & 0 & -12/l^2 & -6/l & 0 & 12/l^2 \\ & 0 & 6/l & 2 & 0 & -6/l & 4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ \varphi_i \\ u_j \\ v_j \\ \varphi_j \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$[K]^e = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 0 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & 0 & 0 & & & \\ & 0 & 0 & 0 & & \\ & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: X_i, X_j 为节点 i, j 轴向力; Y_i, Y_j 为节点 i, j 剪切力; M_i, M_j 为节点 i, j 弯矩; u_i, u_j 为节点 i, j 轴向位移; v_i, v_j 为节点 i, j 横向位移; φ_i, φ_j 为节点 i, j 转

角; E 为挡土结构材料弹性模量; I 为挡土结构截面惯性矩; A 为挡土结构截面面积; l 为单元长度。

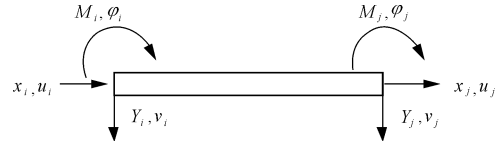


图 3 梁单元计算简图

3 板式挡土结构内力变形的优化因素分析

3.1 支撑位置对板式挡土结构内力变形的优化分析

为研究某一道支撑位置改变对挡土结构内力、位移的影响,通过改变该道支撑点的位置,其他的支撑点位置不变。因实际工程中支撑的位置变化区间范围有限,本文在研究中以原支撑点为中心上下移动相应支撑 1.0 m,以 0.5 m 为倍数,分别计算挡土结构的内力、位移的值并绘制成图表,统计每次的最值。

图 4 为每道支撑位置的连续墙内力、位移图,第一、二、六道支撑位置对挡土结构的内力、位移影响很小,第三、四、五道支撑位置对挡土结构的内力、位移影响相对较大。第一、二、六道支撑位置最大弯矩、最大剪力、最大水平位移出现在连续墙深度 18 m 处,第三、四、五道支撑位置最大弯矩、最大剪力、最大水平位移出现在连续墙深度 24 m 至 28 m 处。

研究每道支撑位置改变对连续墙位移、内力最值的影响,第一、二道支撑位置改变对挡土结构的内力影响很小,挡土结构水平位移最大值不随第一道支撑位置的改变而发生变化,相对第一、二道支撑位置改变,第三、四道支撑位置变化对挡土结构的内力变形稍大。第三道支撑位置分别处于 -6.1 m、-7.6 m 时,相应的 $V_{max}, M_{max}, y_{max}$ 的改变值分别为 9 kN、18 kN·m/m、1.5 mm,影响较小;第四道支撑位置分别处于 -8.7 m、-10.2 m 时,相应的 $V_{max}, M_{max}, y_{max}$ 的改变值分别为 23.1 kN、20 kN·m/m、2 mm,影响也不大。第五道支撑位置分别处于 -11.3 m、-13.3 m 时,相应的 V_{max}, M_{max} 的改变值分别为 67.9 kN、167.5 kN·m/m,而第六道支撑位置分别处于 -13.8 m、-15.8 m 时,相应的 V_{max}, M_{max} 的改变值分别为 97.9 kN、316.4 kN·m/m,表明这两道支撑位置的改变对内力最大值影响很大,但对挡土结构的最大水平位移的影响不大。

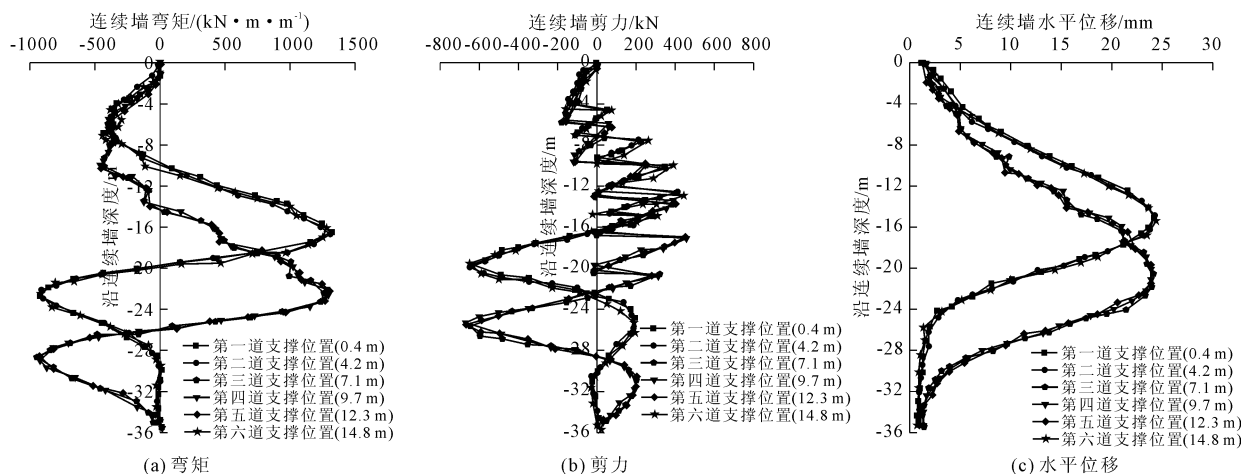


图 4 不同支撑位置的连续墙内力、位移

本文假设系统特性 $F=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 给定某一参数基准状态 $X^*=(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, 系统特性为 $F^*=f(X^*)$, 令各参数在其各自可能范围内变动, 分析由于这些参数的变动系统特性 F 偏离基准状态 F^* 的趋势和程度分别计算各道支撑位置改变量的绝对值 $|\Delta X_i|$ 与其引起的 $\Delta F/F$, 绘制 $\Delta F/F - \Delta X_i$ 图表, 比较系统特性对各个参数的敏感程度, 即倾斜程度(斜率), 斜率越大, 则系统特性对该参数越敏感。计算系统参数 $X = \{$ 第一道支撑位置 x_1 , 第二道支撑位置 x_2, \dots 第六道位置 $x_6\}$ 的改变对系统特性(最大弯矩 M_{\max} 、最大剪力 V_{\max} 、最大位移 y_{\max})的影响。选择 $X^* = \{x_1 = -0.4, x_2 = -4.2, x_3 = -7.1, x_4 = -9.7, x_5 = -12.3, x_6 = -14.8\}$ 为基准

状态, 通过在限定的范围内改变一道支撑的位置 ΔX_i , 其他支撑保持基准状态, 计算系统特性的改变值 ΔF_i 、 $\Delta F/F$, 绘制 $\Delta F/F - \Delta X_i$ 参数分析, 见图 5, 可知随支撑施工顺序的先后, 在 $\Delta F/F - \Delta X_i$ 图中各支撑所对应的斜率有较大增长, 表明支撑越接近开挖面, 对板式挡土结构内力的影响越大, 且后两道支撑所对应的斜率是前四道支撑的几倍甚至是几十倍。通过研究多个基坑开挖挡土结构的实测变形曲线, 发现挡土结构的位移最大值一般都发生在开挖面附近, 这是因为在此处的基坑内外土压力差最大; 因此, 可以认为多道支撑的板式挡土结构的内力受最后两道支撑位置影响较大, 最接近开挖面的两道支撑在其可能的变化范围内具有较大的优化价值。

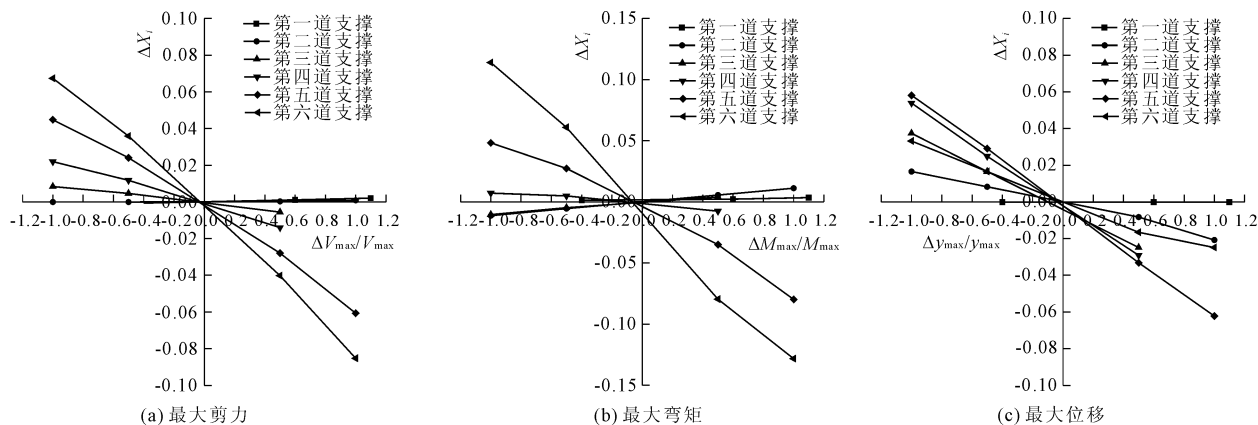


图 5 支撑位置变化对最大剪力、弯矩、位移的参数分析

3.2 插入深度对板式挡土结构内力、位移分析

为研究插入深度对板式挡土结构位移、内力的影响, 通过增加或者减小挡土结构的入土深度(以 1 m 为模数), 分别计算出挡土结构的内力、位移, 图 6 为不同插入深度下, 地下连续墙的内力、位移图, 由

图 6 可知不同插入深度的挡土结构内力、位移变化曲线几乎是重合的。

插入深度对挡土结构内力、位移最值的影响, V_{\max} 、 M_{\max} 、 y_{\max} 的最大改变量分别为 16.2 kN、7.8 kN·m/m、0 mm, 表明插入深度对挡土结构的最大

内力、位移影响甚微,因此,只要连续墙插入深度能满足相应的验算,可不必作为板式挡土结构的优化指标。

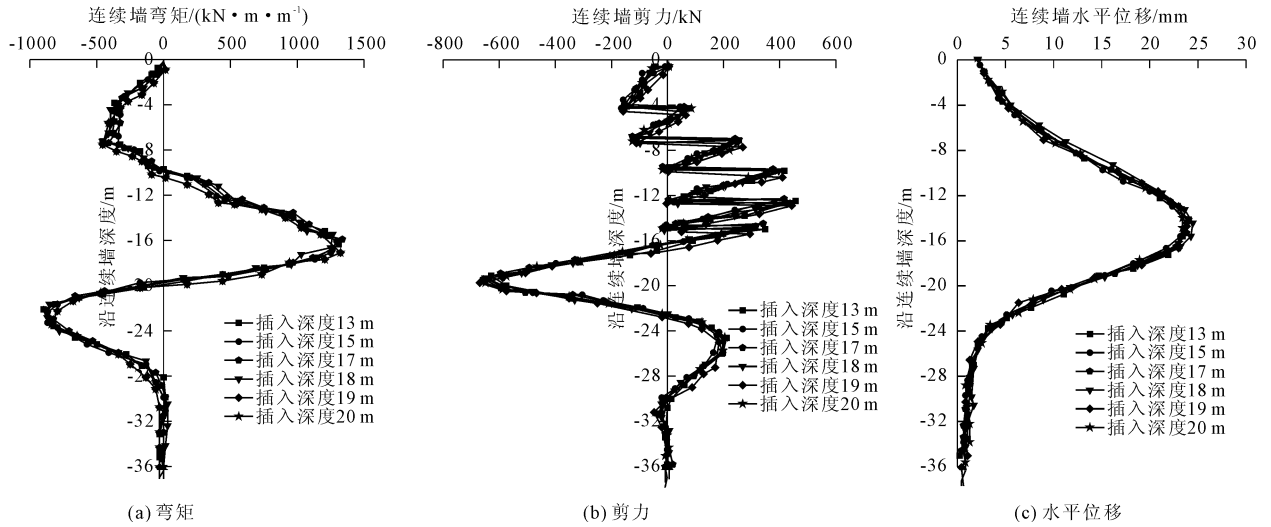


图 6 不同插入深度下地下连续墙的内力、位移

3.3 结构厚度对板式挡土结构内力、位移分析

为研究挡土结构厚度对板式挡土结构内力、位移的影响,通过增加或者减小挡土结构厚度(以 0.1 m 为模数),分别计算出挡土结构的内力、位移,如图 7 所示,不同连续墙厚度的挡土结构的内力、位移

曲线变化规律基本一致,随着连续墙厚度的增加弯矩与剪力越大,水平位移越小,且弯矩与水平位移的影响尤为显著。连续墙厚度为 0.6 m 与 1.1 m 的最大弯矩、最大水平位移差值分别接近 900 kN·m/m、15 mm,最大剪力值的差值接近 110 kN。

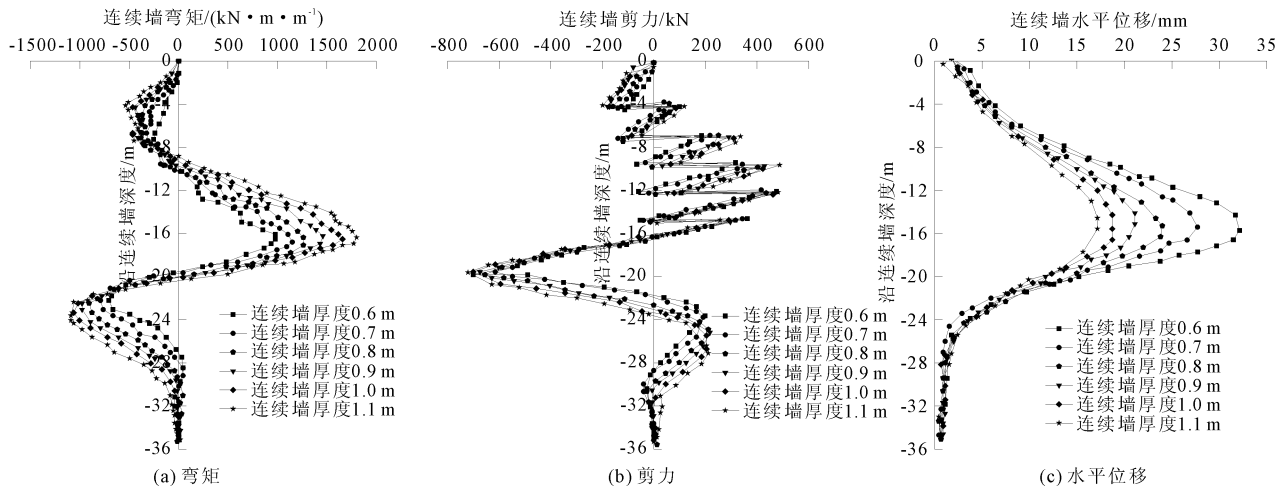


图 7 连续墙厚度对其内力、位移的影响

当厚度分别为 0.6 m、1.1 m 挡土结构的 V_{max} 、 M_{max} 、 y_{max} 从 575.6 kN、984.2 kN·m/m、32.3 mm 变化到 712.2 kN、1790.5 kN·m/m、17.5 mm, V_{max} 、 M_{max} 分别增加 23.87%、81.92%, y_{max} 减少 84.57%, 可知随挡土结构厚度增加其位移减少较大,内力则不断增大,表明挡土结构厚度的变化对其内力变形影响较大,可作为板式挡土结构内力的优化变量。

4 结 论

本文针对具体工程实例采用杆系有限元法对板式挡土结构内力、位移进行了影响分析,得出以下结论:

(1) 开挖面处基坑内外两侧土压力差最大,对于多道支撑的挡土结构,支撑越接近开挖面对结构

内力的影响越大,位移最大值也都发生在开挖面附近,因此,最接近开挖面的两道支撑位置在其可能的变化范围内具有较大的优化价值。

(2) 通过增加或者减小挡土结构的入土深度,计算出挡土结构的内力、位移变化曲线几乎重合,对优化板式挡土结构没有太大效果。

(3) 挡土结构的厚度为0.6 m、1.1 m时, V_{\max} 、 M_{\max} 分别增加23.87%、81.92%, y_{\max} 减少84.57%,随厚度增加内力不断增大,且位移减少也尤为显著。在保证支护结构功能的前提下,考虑工程经济性,挡土结构的厚度作为板式挡土结构的优化变量具有较大的研究意义。

参考文献:

- [1] 殷一弘. 深厚软土地层紧邻地铁深大基坑分区设计与实践[J]. 岩土工程学报,2019,41(S1):129-132.
- [2] 高超,陈涛,翟超,等. 建筑工程施工对临近地铁安全性影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):77-80,125.
- [3] 沈玉涛. 软土地区深大基坑分区开挖力学效应数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报,2017,15(6):23-27.
- [4] 马兆海. 相邻深基坑同期施工支护方案优化研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):186-189,223.
- [5] 刘建航,侯学渊. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1997.

- [6] 秦四清. 深基坑工程优化设计[M]. 北京:地震出版社,1998.
- [7] 龚晓南,高有潮. 深基坑工程设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.
- [8] 建筑基坑支护技术规程:JGJ120—99[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1999.
- [9] 赵志缙,应惠清. 简明深基坑工程设计施工手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1999:4-25.
- [10] 郭方胜. 层次分析法在深基坑支护系统方案优选中的应用[J]. 岩土工程技术,1999(1):3-6.
- [11] 朱彦鹏,杨校辉,周勇,等. 兰州地铁车站深基坑支护选型分析与数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(1):55-59.
- [12] 段绍伟,沈蒲生. 基于工程可靠度、工程造价、工期的深基坑支护结构选型研究[J]. 湘潭矿业学院学报,2002,17(2):79-83.
- [13] 张信贵,吴恒,易念平,等. 深基坑支护工程方案推理机制与优化设计[J]. 岩土力学与工程学报,2004,23(5):871-876.
- [14] 陶莉. 基坑支护方案优选研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [15] 李薇兵. 郑州会展宾馆深基坑支护方案优化研究[D]. 郑州:郑州大学,2008.
- [16] 肖武权,冷伍明. 深基坑支护结构设计的优化方法[J]. 岩土力学,2007,28(6):1201-1211.

(上接第112页)

参考文献:

- [1] 严根华. 我国大跨度闸门应用趋势与抗振对策[J]. 水利水运工程学报,2009(4):134-142.
- [2] 卢新杰,石守津,韩晶,等. 苏州河河口水闸底轴驱动式翻板闸门设计[J]. 水利水电科技进展,2007(S1):11-13,28.
- [3] 罗希,郭雷宁,谭丹,等. 底铰式钢闸门底横轴设计[J]. 水电能源科学,2012,30(5):94-96,213.
- [4] 徐一民,赵伟,杨红宣,等. 掺气挑坎、水流佛氏数及坎后空腔负压对空腔积水的影响[J]. 水力发电学报,2010,29(2):15-20.
- [5] 徐强,饶英定,徐礼锋. 底轴驱动翻板闸门在水闸工程中的应用[J]. 江西水利科技,2014,40(1):17-20.
- [6] 李昕,张建民,彭勇,等. 有压闸室通气孔布置优化研究[J]. 水电能源科学,2017,35(5):120-123,163.
- [7] 张高飞,王新杰. 某钢坝闸消力池底板失稳分析与修

复[J]. 水利水电施工,2015(2):17-19.

- [8] 姜春宝. 底轴驱动式翻板闸门止水形式探讨[J]. 江苏水利,2013(3):20-22.
- [9] 黄智敏,陆汉柱,付波,等. 东山拦河闸下游消能工加固改造研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(6):168-171.
- [10] 李会平. 底流消力池水动力荷载特性研究[D]. 天津:天津大学,2014.
- [11] 严根华. 苏州河河口水闸金属结构数学模型分析[J]. 水利水电科技进展,2007(S1):67-72.
- [12] 严根华. 淹没水跃作用下大宽高比闸门的流激振动试验研究[J]. 振动工程学报(振动工程专集),2005,10.
- [13] 蔡书鹏,唐川林,李大美. 弹性管的紊流减阻效果与流激振动特性的实验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2005,3(3):4-7.