

◆ EBSCO数据库收录期刊(美国)

◆ 《中国知网(CNKI)》系列数据库收录期刊

◆ 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊

◆ 《万方数据-数字化期刊群》收录期刊

◆ 《中文科技期刊数据库》(维普网)收录期刊

◆ 《超星期刊“域出版”平台》收录期刊

ISSN1671-4563
CN44-1386/TU

广东土木与建筑

GUANGDONG ARCHITECTURE CIVIL ENGINEERING



第28卷 Vol.28
32021

ISSN 1671-4563



9 771671 456212

主办：广东省建筑科学研究院集团股份有限公司
广东省土木建筑学会

DOI:10.19731/j.gdtmyjz.2021.03.015

基于硬化土体模型分析基坑开挖对地铁车站的影响

黎浩,杨海星,马杰朋,李保国

(四川志德岩土工程有限责任公司 成都610051)

摘要:随着城市化的发展,地铁也越来越密集,在基坑施工时,若基坑周围有地铁存在,考虑基坑施工对地铁的影响就尤为重要。以昆明市某深基坑开挖为实例,基于硬化土体模型,采用Midas GTS软件进行有限元模拟,并与 m 法计算结果进行对比分析,得出该基坑开挖对地铁区间车站的影响总位移为5.07 mm,提出了地铁车站临近基坑时的基坑支护设计要点,为后续临近地铁车站的基坑支护设计提供依据。

关键词:基坑;硬化土体模型;地铁车站;数值模拟

中图分类号:TU413.6+2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-4563(2021)03-058-04

Analysis of the Influence of Foundation Pit Excavation on Subway Station Based on Hardened Soil Model

LI Hao, YANG Haixing, MA Jiepeng, LI Baoguo

(Sichuan Zhide Geotechnical Engineering Co., Ltd. Chengdu 610051, China)

Abstract: With the development of urbanization, the subway is becoming more and more dense. During foundation pit construction, it is particularly important to consider the influence of foundation pit construction on the subway if there is a subway around the foundation pit. A deep foundation pit excavation in Kunming City is taken as an example, based on the hardened soil model, Midas GTS software is used to conduct three-dimensional finite element simulation, and the results are compared and analyzed with the m method to obtain the key points of the foundation pit supporting design when the subway is near the foundation pit, providing a basis for the subsequent foundation pit supporting design near the subway.

Key words: foundation pit; hardening soil model; subway stations; the numerical simulation

0 引言

近年来城市化进程越来越快,人们对地下空间的利用和开发日益加强,基坑施工周边条件也越来越复杂,特别是临近地铁车站的基坑,对于变形的控制要求尤为重要^[1],但目前基坑支护设计主要采用 m 法,而现有软件对于有限土体作用下的影响以及周边建筑物对基坑的影响的计算分析具有一定的局限性,为更精确地分析基坑施工对周边地铁车站的影响,则需要进行有限分析,有限元模拟的运用已经越来越广泛。基坑支护数值分析常用Duncan-Chang模型(DC模型)、MC模型、Drucker-Prager模型(DP模型)、修正剑桥模型、Hardening-Soil模型(HS模型)等。数值分析的关键就是采用合适的本构模型和计算参数,硬化土模型由于具有可考虑土体压缩性、可模拟土体土体应力增量随应变逐渐减少的硬化现象、能更好地反应土体卸荷的应力-应变关系、采用MC破坏准则、模型主要参数可以通过常规三轴试验及固结试验获取等优点,能更好地模拟墙体的变形,因而成为了基坑数值分析中用得最多的模型之一。国内外也有很多学者进行了硬化土模型的分析,并取得了一定的经验,

作者简介:黎浩(1988-),男,硕士,工程师,主要从事有关岩土工程方面的工作。

E-mail:747502545@qq.com

Schanz^[2]提出,具有反映土体压硬性、剪胀性,区分加卸载刚度,同时考虑剪切硬化和压缩硬化等优点,能够很好体现出土体在三轴试验和固结试验中的力学特性,特别是土体刚度对应力路径的依赖性。李亚玲等人^[3]提出通过计算得到Hardening-Soil模型的参数数值;王卫东等人^[4-5]提出上海地区及其他软土地区基坑工程数值分析中的HS模型参数的参考值,并进行了参考值的验证;董学超等人^[6]得出土样压缩应力-应变试验曲线最为敏感度的参数为切线模量 E_{oad} 和应力水平相关幂指数 m ;胡正波^[7]得出了建构筑物临近地铁车站时地铁车站基坑的设计要点;谢建斌等人^[8]得出了符合昆明当地的基坑开挖变形规律。本文以昆明市某基坑工程为研究对象,利用Midas GTS有限元分析软件^[9],模拟不同工况下的地铁车站变形,为类似基坑支护设计提供一些参考。

1 工程概况

昆明市某基坑项目地下室为3层,局部1层,基坑呈狭长带状;基坑面积约为28 443.0 m²,基坑总长约为1 094 m。本工程基坑开挖深度约为6.5~23.4 m。基坑周边环境(见图1)较为复杂,地铁车站就位于项目西侧,地铁车站地连墙(即:11-11剖面)距离所建基坑边仅有8.4 m,地铁车站为2~3层地下室,车间站支

护采用800 mm地下厚连续墙+内支撑形式支护,目前地铁车站结构部分已完成。



图1 基坑俯视图

Fig.1 Top View of Foundation Pit

场地地基土按成因类型可分为人工填土层(Q_4^{ml})、冲洪积层(Q_4^{al+pl})、寒武系中统陡坡寺组($\epsilon 2d$)砂岩、灰岩构成。支护范围内土层状态如表1所示,根据地区经验,受大气降水影响,拟建场地地下水位年变幅约为0.50~1.50 m。场地地下水类型主要为孔隙型潜水及基岩裂隙水。

表1 基坑范围内土层状态

Tab.1 Soil Layer State within the Scope of Foundation Pit

层号	土层	土层状态
①	素填土	密实、局部松散
② ₁₋₁	粉质粘土	硬~可塑
③ ₁	全风化砂岩	硬塑,局部可塑
③ ₂	强风化砂岩	软岩、碎石状、碎块状
③ ₃	中风化砂岩	较软岩、破碎状
④ ₁	强风化灰岩	软岩、碎石状、碎块状
④ ₂	中风化灰岩	坚硬岩、破碎

2 基坑计算及分析

2.1 m法建模分析

根据图1中基坑与地铁车站的位置关系,11-11剖面距离地铁车站最近处仅为8.4 m,选取距离地铁车站最近的11-11剖面进行建模分析,同时选取相对应的9-9剖面,与11-11剖面进行联合分析,以此和下章的有限元模拟做比较;采用“同济启明星FRWS8.2”考虑坑外有限土体的作用进行建模分析。

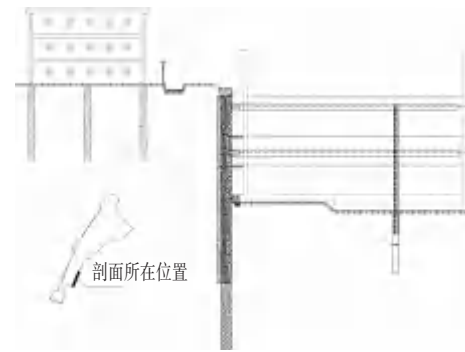
基坑剖面开挖深度为16.6 m,采用的支护形式为桩+内支撑,其中9-9剖面为 $\phi 1\ 300@1\ 500$ 排桩+2道钢筋混凝土支撑+ $\phi 1\ 000@1\ 500$ 高压旋喷桩咬合止水帷幕。11-11剖面为 $\phi 1\ 500@2\ 000$ 排桩+2道钢筋混凝土支撑,剖面支护如图2所示。

建模步骤如下:

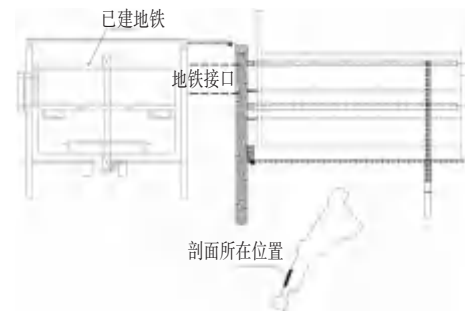
(1) 放坡开挖至第1道支撑以下0.5 m,架设第1道

支撑,同理加第2道支撑后,挖至坑底16.6 m。

(2) 开挖至坑底后,浇筑混凝土垫层,随楼层楼板位置架设换撑板及拆除相应支撑。



(a)9-9



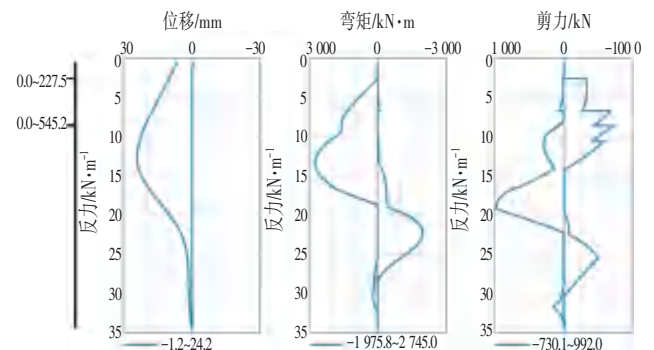
(b)11-11

图2 剖面支护

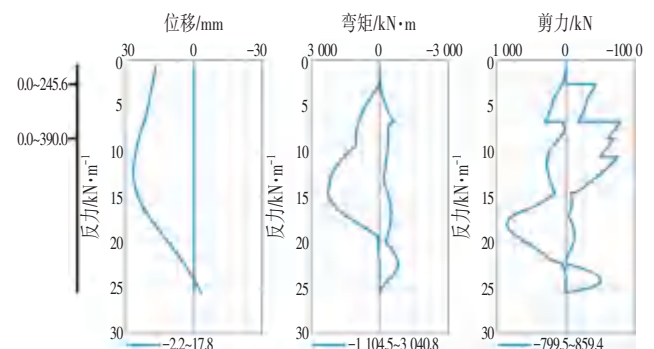
Fig.2 Section Support

2.2 计算结果及分析

根据“同济启明星FRWS8.2”计算结果显示(见图3),



(a)9-9剖面



(b)11-11剖面

图3 剖面内力位移包络图

Fig.3 Envelope Diagram of Internal Force Displacement in Profile

①9-9剖面1、2道支撑轴力分别为227.5 kN和545.2 kN,最大水平位移为24.2 mm,最大弯矩为1 975.8 kN,最大剪力为730 kN;
②11-11剖面1、2道支撑轴力分别为245.6 kN和390.0 kN,最大水平位移为17.8 mm,最大弯矩为1 104.5 kN,最大剪力为799.5 kN。

3 基于硬化土模型的数值模拟分析

3.1 本构模型及物理力学指标的选取

硬化土模型相对于摩尔库伦模型是一种更高级的土体模型,由于它能够反映基坑变形中加载-卸载-再加载的过程,且指标容易获取,更能贴近实际工程。因此采用硬化土模型来进行模拟,以此核实模拟与设计差异。

硬化土模型参数 $E_{\text{oad}}^{\text{ref}}$ 、 E_{50}^{ref} 、 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 按照式(1)进行计算^[1,8,10]:

$$\begin{cases} E_{\text{oad}}^{\text{ref}} = (0.8 \sim 1.1) E_s^{1-2} \\ E_{50}^{\text{ref}} \approx E_{\text{oad}}^{\text{ref}} \\ E_{\text{ur}}^{\text{ref}} = (3 \sim 5) E_{50}^{\text{ref}} \end{cases} \quad (1)$$

根据式(1)计算得到各土层的参数指标,如表2、表3所示。

3.2 建立有限元模型

通过以上各土层的参数指标,选用硬化土模型,采用Midas GTS软件建立针对9-9剖面和11-11剖面的二维有限元模型,如图4所示。



图4 基坑二维有限元模型

Fig.4 Two-dimensional Finite Element Model of Foundation Pit

模型土体采用2D平面应变单元,本构模型采用硬化土模型,模型尺寸为长173 m×高69 m,为了更好地模拟地铁站变形,网格大小取0.3 m;地铁结构及地连墙采用2D平面应变单元模拟,支护桩、支撑、立柱及格构柱采用梁单元模拟,换撑刚性铰采用铰接方式约束,本构采用线弹性模型;节点数为131 988个节点,单元数为131 306个单元。按照基坑施工顺序施工阶段如下:[工况1]初始应力分析;[工况2]地铁站施工地应力的影响分析;[工况3]围护结构施工、土方开挖至第1道支撑位置;[工况4]施工第1排内支撑,土方开挖至第2道支撑位置;[工况5]施工第2道支撑,土方开挖至坑底;[工况6]施工地下室底板;

表2 物理力学参数指标

Tab.2 Physical and Mechanical Parameters

土层编号	土层名称	天然重度 /kN·m ⁻³	抗剪强度指标		压缩模量	切线刚度	割线刚度	卸载弹模
			c/kPa	$\varphi/^\circ$	$E_{s0.1-0.2}/\text{MPa}$	$E_{\text{cut}}/\text{MPa}$	E_{50}/MPa	E_{ur}/MPa
①	素填土	20.4	20	7	5.96	5.96	5.96	23.84
② ₁₋₁	粉质粘土	19.4	30	8	6.30	6.30	6.30	31.50
③ ₁	全风化砂岩	19.3	28	10	7.50	7.50	7.50	37.50
③ ₂	强风化砂岩	23.0	58	25	80.00	105.90	105.90	317.80
③ ₃	中风化砂岩	24.0	120	35	140.00	174.60	174.60	524.00
④ ₁	强风化灰岩	23.0	70	28	110.00	140.60	140.60	421.80
④ ₂	中风化灰岩	25.5	200	42	200.00	263.00	263.00	789.00

表3 结构材料物理力学参数一览

Tab.3 List of Physical and Mechanical Parameters of Structural Materials

结构名称	材料名称	密度/kg·m ⁻³	弹性模量/GPa	泊松比
地铁车站结构	C35混凝土	2 500	31.5	0.2
地连墙	C35混凝土	2 500	31.5	0.2
支护桩	C30混凝土	2 500	30.0	0.2
立柱桩	C30混凝土	2 500	30.0	0.2
格构柱	Q345型钢	7 850	206.0	0.3

[工况7]换撑,拆除第2道支撑;[工况8]换撑,拆除第1道支撑。

4 计算结果分析与讨论

通过Midas GTS有限元软件进行数值模拟所得分析结果,并分别提取拆撑后的X方向基坑水平位移云图,如图5(a);基坑竖向位移云图,如图5(b);基坑总位移云图,如图6,进行分析。



(a)水平位移



(b)竖向位移

图5 基坑水平位移云图

Fig.5 Displacement Cloud Map of Foundation Pit

根据有限模拟所得云图结果(见图5、图6),与m法计算所得的位移结果进行对比分析,分别对9-9剖面、11-11剖面的最大水平位移进行比较,比较结果如表4所示。根据表4结果,对比9-9剖面和11-11剖面,可知:

表4 m 法与有限元法对比分析
Tab.4 Comparative Analysis of m Method and Finite Element Method

工况	地铁侧支护 最大水平位移/mm		小区侧支护桩 最大水平位移/mm		地铁侧支护 最大竖向位移/mm		小区侧支护桩 最大竖向位移/mm		地铁结构 最大合位移 /mm
	m 法	有限元法	m 法	有限元法	m 法	有限元法	m 法	有限元法	
3	+4.1	+1.33	+0.9	+1.76	-2.0	-0.6	-0.4	-0.4	+0.31
4	+8.1	+5.96	+7.7	+9.75	-7.9	-9.7	-5.7	-9.5	+2.19
5	+17.8	+14.71	+24.2	+22.60	-22.7	-20.3	-21.1	-23.9	+4.30
6	+17.8	+14.71	+24.2	+22.60	-22.7	-20.3	-21.1	-23.9	+4.30
7	+17.7	+14.71	+23.9	+22.80	-23.3	-20.7	-21.6	-24.1	+4.50
8	+17.7	+14.71	+24.0	+22.80	-23.7	-21.3	-21.8	-24.1	+5.07

注:“+”表示向坑内或向下,“-”表示向坑外或向上。



图6 总位移云图
Fig.6 Total Displacement Cloud Diagram

(1) 通过对小区位置处所采用 m 法计算所得的水平位移和竖向位移,与采用硬化土模型数值模拟计算所得的位移进行对比,两者最大处相差为2.8 mm,变形趋势也基本吻合,在此对比的基础上可以对基坑另外靠地铁的一侧进行分析。

(2) 基于以上结论,可以对基坑一侧(11-11剖面)的地铁车站进行模拟分析,可知地铁车站侧最大位移为5.07 mm,满足《地铁设计规范:GB 50157—2013》^[11]的要求,因此基坑对地铁车站的影响较小。

5 结论

本文通过利用硬化土模型,结合昆明市某基坑工程桩+内支撑的支护体系,通过采用 m 法进行设计计算,并且利用Midas GTS有限元进行数值模拟后,对两者所得结果进行对比分析,并根据以上对比结果来分析基坑施工对地铁车站的影响,得到如下结论:

(1) 针对桩+内支撑支护体系,采用硬化土模型进行二维有限元数值模拟,与 m 法两者所得结果进行对比,两者结果较为吻合;

(2) 通过有限元模拟分析,可进行基坑开挖对地铁车站的影响,基坑开挖至坑底后,地铁车站总位移为5.07 mm,基坑开挖对地铁车站的影响较小,且在文献[11]规定的范围内;

(3) 在对临近地铁车站的基坑进行支护设计时,基坑一侧地铁车站为有限土体作用,通过常规的 m 法

进行基坑支护设计,计算定性分析地铁车站,同时辅以Midas有限元模拟来定量分析地铁的影响,以此为设计提供依据。

参 考 文 献

- [1] 刘建航,王卫东. 基坑工程手册(第二版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model formulation and verification [C]. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Amsterdam, Balkema, 1999:281-296.
- [3] 李亚玲,张彬,苏海峰,等. Hardening-Soil模型中参数选取试验研究[C]. 第九届全国工程地质大会论文集,2012:178-183.
- [4] 王卫东,王浩然,徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体HS-Small模型参数的研究[J]. 岩土力学,2013,34(6):1766-1774.
- [5] 王卫东,王浩然,徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(8):2283-2290.
- [6] 董学超,王水林,郭明伟,等. 基于压缩试验曲线的HSS模型参数优化[J]. 岩土力学,2020,41(S2):1-9.
- [7] 胡正波. 地铁车站基坑开挖对周边建筑物影响研究[J]. 土工基础,2019,33(1):7-10.
- [8] 谢建斌,曾宪明,胡井友,等. 硬化土模型在桩锚与桩撑组合支护深基坑工程中的应用[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):56-63.
- [9] Midas/GTS用户手册[Z]. 北京:北京迈达斯技术有限公司,2015.
- [10] 李广信,张丙印,于玉贞. 土力学(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [11] 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.