

连接邻近构筑物的基坑桩锚支护系统 应力应变特征分析

王中南¹, 王新建¹, 赵永胜², 赵传奇³

(1. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 2. 黄河水利委员会, 河南 郑州 450003;
3. 河南发展燃气有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 城区用地紧张导致基坑支护结构与周围建筑结构形成整体的支护体系将会成为未来基坑工程不可避免的模式。掌握与邻近地下结构连接的基坑支护系统应力应变规律、破坏模式对指导工程实践具有重要的意义。运用数值法和快速拉格朗日差分法研究与邻近地下结构物连接的桩锚支护系统的应力应变规律。研究表明: 支护系统与地下车库连接后, 支护结构及地下车库部分均发生应力集中; 当基坑周围存在地下结构物时, 将结构物靠近基坑一侧土体全部清除会使基坑侧壁变形减小, 但会增加地下结构物受力变形, 地下车库侧墙与底板交接处变形最大, 支柱位置受力最大。当邻近地下结构物强度较低时可保留基坑侧壁与结构物之间的土体, 以缓冲应力传递, 在一定程度上保证地下结构物安全。

关键词: 基坑工程; 桩锚支护; FLAC^{3D}; 应力应变特征

中图分类号: TU94⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2022)03—0115—07

Stress-strain Characteristics of Pile Anchor Supporting System Connected with Adjacent Underground Structure

WANG Zhongnan¹, WANG Xinjian¹, ZHAO Yongsheng², ZHAO Chuanqi³

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450046, China;
2. Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou, He'nan 450003, China;
3. He'nan Development Gas Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan 450000, China)

Abstract: The supporting structure of the foundation pit and surrounding building structure form an integral supporting system, which will become the inevitable mode of foundation pit engineering in the future due to the urban land tension in urban areas. It is of great significance to master the stress-strain law and damage mode of the foundation pit supporting system connected with the adjacent underground structure to guide the engineering practice. The stress-strain rule of the pile-anchor support system connected to adjacent underground structures is analyzed by the numerical method and the Fast Lagrangian Analysis of Continua. The study shows that after the support system and the underground garage, the supporting structure and the underground garage are concentrated; when the underground structure exists around the foundation pit, the removal of the soil near the foundation pit will reduce the sidewall of the foundation pit, but increase the force deformation of the underground structure. The junction between the sidewall and the underground garage has the maximum deformation, and the pillar position has the maximum force. When the strength of the adjacent underground structures is low, the soil between the foundation pit sidewall and the structure can be retained to buffer the stress transmission and ensure the safety of the underground structures to a certain extent.

Keywords: foundation pit engineering; pile-anchor retaining; FLAC^{3D}; stress-strain characteristic

城市内基坑工程与环境之间的关系越来越紧密,基坑与周围地下结构物形成整体将会是基坑工程发展的一个必然模式,其对周边紧邻环境形成了巨大的挑战^[1],基坑开挖能够导致现有建筑结构产生变形甚至造成既有结构发生严重损坏^[2]。基坑支护在设计 and 施工中的重点如基坑土体变形规律、安全与稳定以及围护结构变形等,支护结构侧移会引起坑外土层也随之移动,使坑外地层水平应力减小,产生塑性区^[3],危害周围建筑物安全。

桩锚支护结构的研究综合程度较高,涉及桩、锚杆、施工及测量等。许多学者通过理论、现场、试验、模拟计算等方式对桩锚支护结构进行了长期的研究^[4-5]。冯国春^[6]通过对大良站基坑现场施工监测及成果分析,得到了地表沉降、地连墙水平位移和邻近建筑沉降规律。羊科印^[7]分析建筑基坑桩锚支护结构对周边建筑物竖向变形的影响,同时研究了桩径对周围建筑物沉降的影响。采用正交试验的方法得到各设计因素对周围建筑物沉降的影响程度依次为基础上部荷载、桩长、锚索预应力。周勇等^[8]以工程实际监测数据研究分析了“一桩两用”的特殊支护形式应力应变规律。李连祥等^[9]通过数值法分析了基坑开挖对邻近建筑桩基础的影响,探究了基坑开挖对复合地基桩的应力应变作用机理,并证实桩身间距对桩身受力的影响。马野等^[10]、刘公然^[11]采用 MIDAS/GTS 软件分析了基坑开挖深度对支护结构内力、支护桩位移及坑底隆起的影响。徐勇等^[12]利用桩锚支护结构解决了复杂支护问题,总结了桩锚支护结构的优点。韩知霖^[13]通过数值法得到了基坑开挖引起土体位移规律,但其在计算过程中所采用的开挖方式与实际情况存在一定的偏差。邹玉强等^[14]通过数值模拟的方式分析采用地下连续墙+内支撑支护方式的基坑工程开挖对周围柱下独立基础建筑物的影响,认为基坑周围建筑物最大沉降发生在基坑开挖见底时。Jiang 等^[15]针对城市用地紧张的大环境,提出“zero-occupancy”基坑支护结构设计思路,能够克服传统支护方法土地资源浪费的缺点。

通过对前人相关研究成果分析发现城市中狭小空间内复杂支护结构相关研究在以下几个方面还需要进一步研究:(1)针对城市内狭小环境中采用的特殊、复杂支护结构的支护效果以及对周边环境的影响规律需进一步研究;(2)当基坑工程与邻近结构形成联动时,对与邻近地下结构连接的基坑支护系统应力应变规律需进一步研究。

1 工程概况

1.1 工程简介

工程位于郑州市金水区北部某地,地貌单元属黄河泛滥冲积平原,无不良地质作用。根据静力触探、原位测试、土样室内试验成果基坑开挖范围内主要为粉土、粉质黏土和砂土层。抗震设防烈度为 7 度。基坑开挖深度 11.3 m~11.7 m,基坑开挖面积约 40 000 m²。基坑东侧开挖深度 11.3 m,与已建成地下车库外墙距离 6.5 m~8.0 m。基坑示意图如图 1 所示。

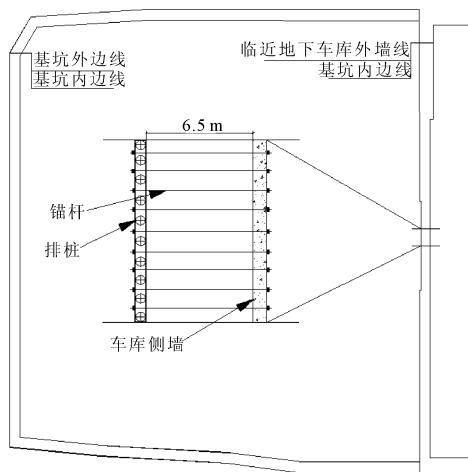


图 1 基坑工程示意图

本研究主要集中在基坑东侧,基坑东侧距离地下车库 6.5 m~8.0 m,地下车库深度约 8 m,车库上部有 1.2 m 覆土。基坑东侧部分根据支护桩与地下车库相对位置,分为 4 个剖面,东侧简图如图 2 所示。

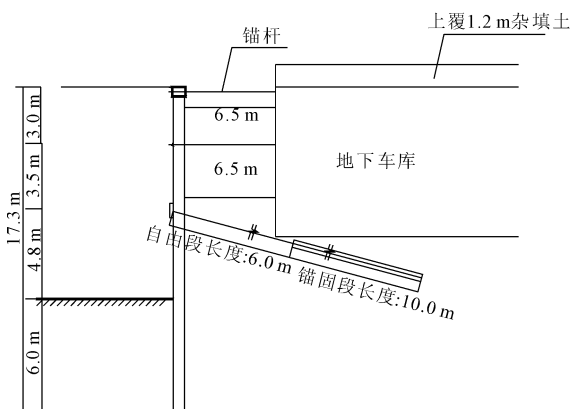


图 2 东侧支护结构设计图

1.2 工程地质状况

对基坑开挖范围内的土层进行了直剪试验、颗

粒分析试验、砂土筛分试验、密度及含水率试验、常规固结试验以及三轴不排水(UU)试验。相关物理参数见表1。

表1 土层参数

土层名称	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/%	压缩模量 E_s /kPa	黏聚力 C /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)	承载力特征值 /kPa
杂填土	18.5	23.0	4.3	5.0	9.0	100
粉土	18.3	23.1	7.5	13.0	23.9	120
粉土	18.2	23.2	7.9	11.5	23.9	130
粉质黏土	18.6	25.8	5.5	24.7	10.0	110
粉土	18.6	23.9	7.1	13.0	24.9	120
粉质黏土	18.8	24.3	6.6	29.5	10.5	110
细砂	19.3	23.8	24.0	3.0	30.0	220
粉土	15.5	21.8	12.5	13.2	23.5	200
粉质黏土	15.2	24.5	10.6	28.7	12.2	240
粉质黏土	14.7	25.6	11.3	30.5	12.7	260
粉土	15.2	23.1	14.8	12.9	18.8	220

勘察范围内初见水位埋深 9.7 m ~ 10.5 m, 平均水位 10.2 m 左右; 稳定水位埋深 10.2 m ~ 11.1 m, 平均 10.7 m。

2 数值模型建立

本研究采用 FLAC^{3D} 进行模拟, 假设围岩土体材料为均质、各向同性的连续介质, 为理想弹塑性材料。土体采用摩尔-库仑弹塑性模型, 用实体单元进行模拟。桩、锚、梁采用结构单元模拟, 锚索预应力一次性施加且无应力损失。计算过程不考虑渗流影响。地下车库采用弹性本构, 同时清除初始地应力平衡所产生的位移和加速度, 保持与实际工程开挖前相同的土体受力状态。模型侧边边界施加垂直的水平约束, 形成滚轴支座以限制模型法向位移; 模型底部施加所有方向位移, 形成固定铰支座以限制各个方向的位移; 模型顶部为自由边界。

2.1 模型的建立

本文选取基坑东侧支护结构和邻近地下车库为研究对象。主要分析东侧部分的应力应变、支护结构受力变形性状及基坑开挖对邻近地下车库所产生的影响。相关土层参数取值根据岩土工程勘察报告和郑州市相关地质资料提供的土层物理力学指标选取, 见表1。依据圣维南原理, 模型整体尺寸为 156.5 m × 20.0 m × 37.5 m (长 × 宽 × 高), 模型中节点数 63 588, 单元数 56 252。基坑整体模型如图3所示。

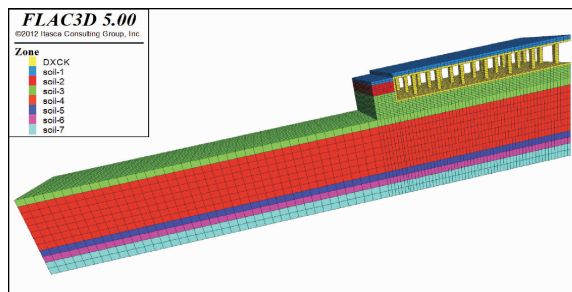


图3 基坑开挖后模型与分组

根据基坑支护方案确定锚杆、桩、梁参数如表2—表4所示。

表2 锚杆参数取值

位置/排	长度 /m	锚固段长度 /m	弹性模量 /GPa	抗拉强度 /MPa	倾角 /($^\circ$)	间距 /m	预应力 /kN
一	6	0	200	1320	0	1.5	0
二	6	0	200	1320	0	4.5	0
三	16	10	200	1320	15	1.5	200

表3 排桩参数取值

混凝土强度等级	桩径 /mm	桩长 /m	截面惯性矩	截面极惯性矩	弹性模量/GPa
C30	600	17.3	0.0064	0.0128	30

表4 梁参数取值

位置	截面积/ m^2	弹性模量/GPa	泊松比
冠梁	0.475	28	0.2
腰梁	0.012	210	0.3

对于地下车库部分的模型建立, 参照实际工程结合软件特性, 其弹性模量取 3.15×10^4 MPa、密度取 2350 kg/m^3 、泊松比取 0.23。本模型中桩、锚、梁采用结构单元模拟。桩锚支护与地下车库模型如图4所示。

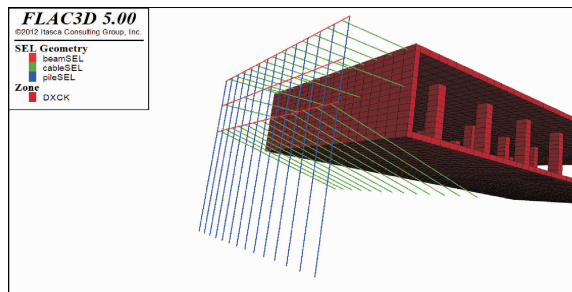


图4 结构单元与地下车库

2.2 模拟计算步骤

根据实际工程情况, 将计算中的开挖支护过程

分为以下五个步骤,见表 5。

表 5 开挖支护步骤

步骤	施工内容
步骤 1	开挖至 9.2 m,并在 11.0 m 处施加第一排钢索
步骤 2	开挖至 7.1 m,并在 8.0 m 处施加第二排钢索
步骤 3	开挖至 4.5 m,并在 5.0 m 处施加第三排锚索
步骤 4	开挖至 2.0 m 处
步骤 5	开挖至基坑底部(0.0 m)

3 模拟结果分析

3.1 基坑边坡位移分析

基坑开挖完成后基坑底面隆起最大值为 11.54 mm;基坑侧壁位移大致呈现上大下小分布趋势,并出现波浪形分布,最大水平位移量为 9.15 mm,发生在基坑顶部,基坑侧壁及支护桩存在一定的上浮;基坑周围土体总沉降量较小,坑外土体最大沉降量为 1.22 mm。总位移图如图 5 所示。

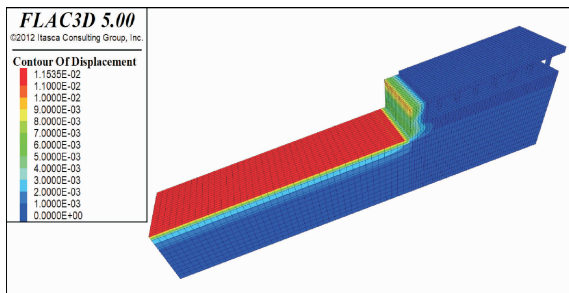


图 5 开挖完成后总位移

3.2 支护结构应力应变分析

开挖过程中支护桩在土压力作用下产生基坑内侧位移。各步骤下最大位移值依次为:3.59 mm、5.65 mm、7.69 mm、8.49 mm、9.02 mm,均发生在支护桩顶部附近,如图 6 所示。随着基坑开挖支护桩位移量增大,分布规律为距离桩顶越远位移量越小,距离桩顶约 13 m 时支护桩位移趋于稳定。原因是:随着开挖的增大支护桩所受土压力逐渐增大,但支护桩后土体体积较小产生的主动土压力较小,在锚杆与锚索作用下有效的限制了桩身变形。支护桩位移与传统桩锚支护结构位移分布规律略有不同,支护桩桩身位移随着深度增加而减小,但由于地下车库的存在下部土体受荷载较大导致支护桩下部位移增大。

桩身在土压力以及锚杆、锚索的共同作用下,桩身所受弯矩呈“弓”字型分布,最大负弯矩为 237.45 kN·m,最大正弯矩为 117.94 kN·m。由于地下车

库的作用支护桩最大正弯矩较小,出现在地下车库底部位置,如图 7 所示。与以往文献[16]中桩身弯矩相比该支护结构桩身弯矩较大,地下车库的存在会增加支护桩所受弯矩影响基坑安全。

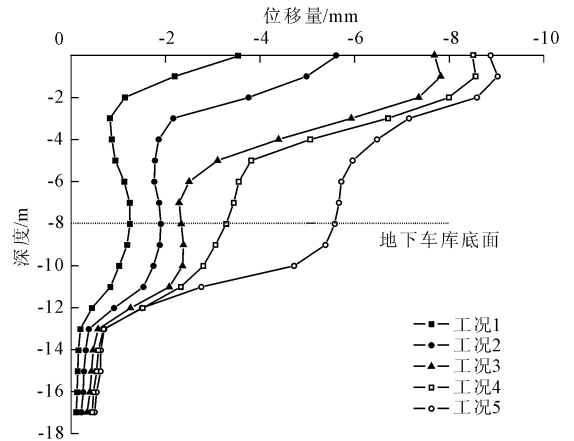


图 6 各步骤桩身位移曲线

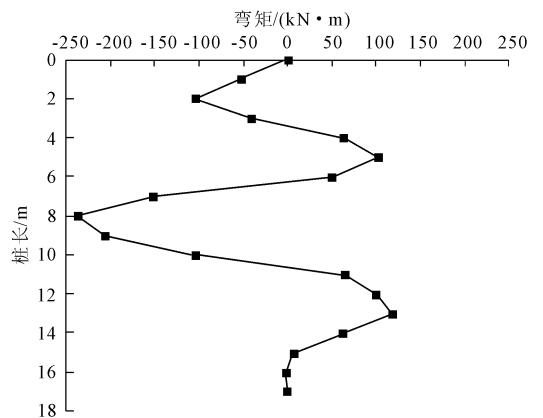


图 7 桩身弯矩

开挖过程中支护桩水平应力方向在开挖面附近发生变化,开挖面以上应力指向基坑内侧开挖面以下应力指向坑外土体。基坑下部水平应力最大值发生在开挖面以下 0~2 m 处,随后急剧减小并随之稳定,如图 8 所示。

锚索自由段轴力分布均匀且保持一致,说明未受到侧向摩擦力的作用。锚固段因受到周围土体摩擦阻力作用,轴力随着距离自由段越来越远呈下降趋势最终在锚固段远端逐渐稳定。锚索最大轴力 313.22 kN、最小轴力为 25.22 kN,如图 9 所示。

上部锚杆轴力整体较小较为一致,第一、二排锚杆轴力分别为 43.12 kN、52.78 kN。其原因为锚杆部位特殊构造,整体相当于自由段仅起到传递拉力的作用,而地下车库相当于锚杆的锚固体。锚杆本身轴力数值相对于锚索自由段所受轴力较小,其原

因是地下车库的存在导致支护桩后土体较少,在基坑开挖过程中作用于支护桩的土压力较小,同时地下车库部分因其整体性较好未对桩体产生土压力,支护桩上部所受土压力相对较小。锚索部分轴力较大,说明地下车库下部土体所受荷载较大,所引发的基坑侧壁土压力较大。从基坑边坡及支护结构受力变形分析可以看出,地下车库的存在会通过增大其下部土体受力的方式增大支护结构下部受力和变形量,对基坑工程产生不利影响。

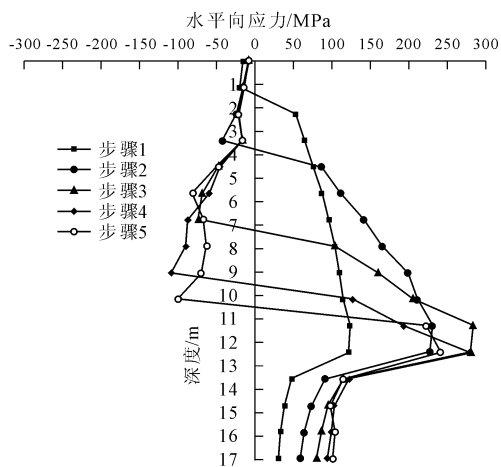


图 8 各施工步骤下支护桩水平应力

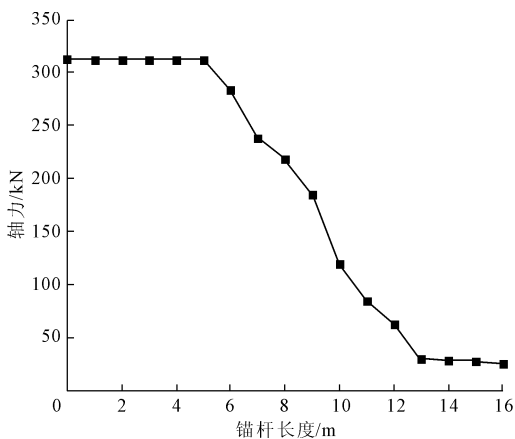


图 9 施工完成后锚索轴力

3.3 地下车库受力变形分析

3.3.1 地下车库整体应力应变分析

地下车库部位整体最大水平位移值为 0.31 mm,相对支护结构位移较小;墙体水平位移沿深度增加而增大,最大位移发生在墙体下部,水平方向随着与开挖面距离的增加而减小。底板处水平位移大于顶板处。地下车库部分整体垂直位移较小,靠近基坑部位整体存在上浮趋势;中部发生沉降,后随着与开挖面距离的增加沉降逐渐减小直至消失。与水

平位移不同的是,地下车库相同位置顶板、底板垂直变形量较为一致。

地下车库作为整体作用于其下部土体,导致支护桩及桩后土体发生上浮进而引起地下车库部分上浮。地下车库整体沉降差为 0.18 mm,沉降差较小。地下车库最大位移发生在侧墙位置而锚杆处未发现明显位移突变,说明整个支护结构在土体开挖完成后产生的拉力未对地下车库产生不利影响。地下车库受力仍存在一定余量,锚杆在墙体位置产生的拉力远未达地下车库抗拉强度极限。

图 10、图 11 分别为开挖完成后地下车库部分最大主应力分布云图与最大剪应力分布云图,从图中可知:基坑开挖完成后墙体部分应力较小且整体变化较小;底板与顶板主要受到拉应力作用,在支柱附近应力最大并逐渐向外减小;支柱部分主要受压应力作用,且最大应力主要集中在柱子上下两端,并随着与基坑开挖面距离的增大支柱压应力逐渐减小。支柱部分剪应力较大,且随着与基坑开挖面距离的增加剪应力逐渐减小,顶板与底板上支柱位置周围剪应力较大,并逐渐向外减小。侧面墙体部分剪应力从上到下呈增大趋势。

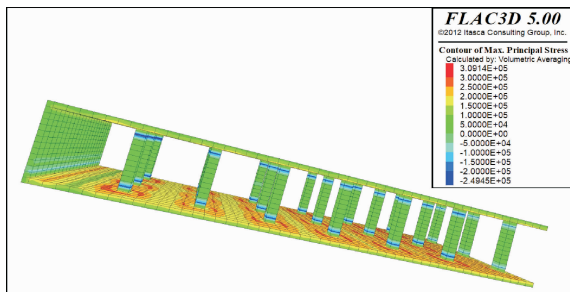


图 10 开挖完成后地下车库整体主应力分布

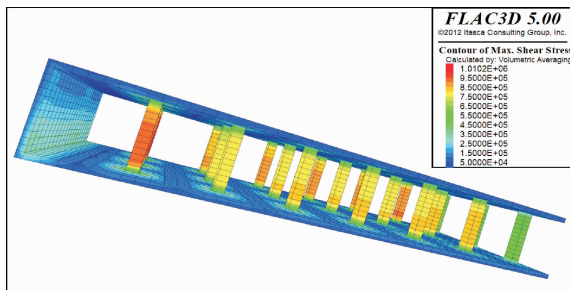


图 11 开挖完成后地下车库部分剪应力分布

3.3.2 地下车库侧墙应力应变分析

地下车库侧墙与支护结构直接连接,受力变形较大。墙体最大拉力值为 46.70 kN,发生在深度约 4.5 m 处;墙体所受拉力在墙体埋深大约 5 m 处发

生突变猛然减小至埋深约 7 m 时几近消失,墙体受力主要集中在墙体上部,如图 12 所示。其原因在于锚杆引起侧墙拉力增大,两排锚杆分别于地下车库顶部及埋深约 3 m 处连接。支护桩产生的拉力通过锚杆传递至地下车库墙体上部,引起地下车库墙体上部所受拉力增大超出影响范围后水平拉力迅速降低。锚杆连接处未发生明显拉力突变,基坑开挖过程未对邻近地下车库产生不利影响。

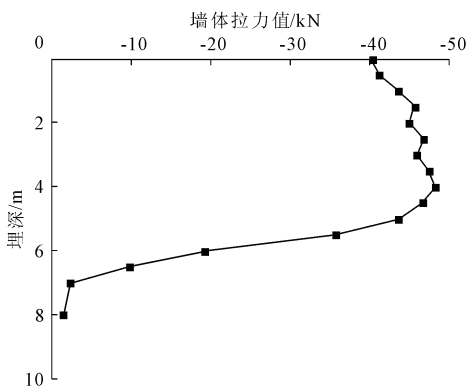


图 12 开挖完成后地下车库侧墙受力曲线

最大剪应力为 329.38 kPa 发生在侧面墙体靠下部位,最小剪应力为 64.78 kPa 发生在顶板位置,剪应力整体呈现“上小下大”的分布。水平位移分布趋势与剪应力分布趋势大致相同,最大位移量为 0.31 mm 发生在底板以上位置,最小位移量为 0.05 mm 发生在顶板位置,如图 13 所示。

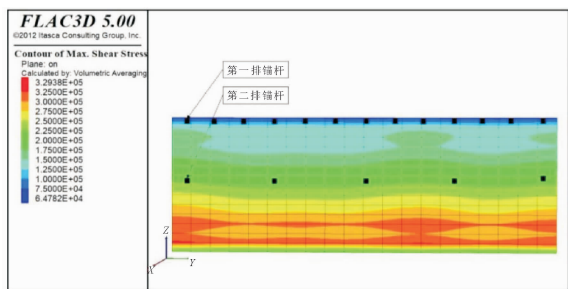


图 13 开挖完成后地下车库侧墙剪应力分布

地下车库侧面墙体直接连接支护桩为支护结构充当锚固体,是地下车库部分主要承受支护结构拉力的部位。从地下车库位移与应力分布规律可以看出地下室侧墙与锚杆连接处并未发生明显位移突变,如图 14 所示。基坑采用与地下车库连接的支护结构对地下车库变形影响较小,地下车库产生的变形主要是由于地下车库本身密度较大其作用于土体之上所引起的土压力变化所致。

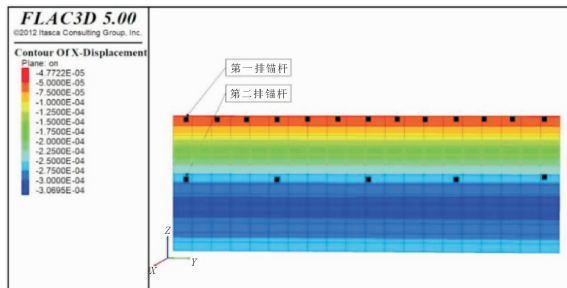


图 14 开挖完成后地下车库外墙水平位移

3.3.3 地下车库底板应力应变分析

图 15、图 16 分别为开挖完成后地下车库底板剪应力分布云图和主应力分布云图。由图可知:底板位置剪应力和主应力分布以柱子下方为中心呈现“回”字形向外减小,影响范围约 1~3 倍柱径,最小剪应力为 67.69 kPa,最大剪应力为 309.83 kPa。随着与基坑开挖面距离的增加支柱下方的最大剪应力逐渐减小。底板其他位置主应力分布相对较小且分布均匀。墙体下方未出现较大主应力分布。支柱在整个地下车库中主要承担上部顶板及覆土产生的荷载并将荷载传递至底板,因此在底板上产生一定程度上的应力集中最终形成应力环绕柱子下方的分布方式。

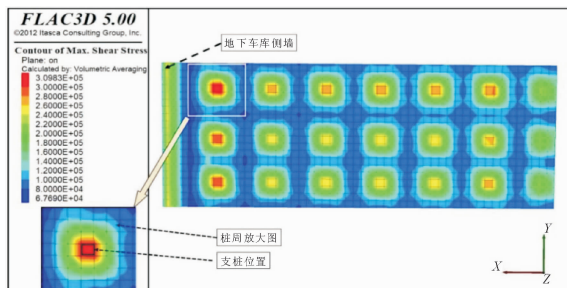


图 15 开挖完成后地下车库底板剪应力分布

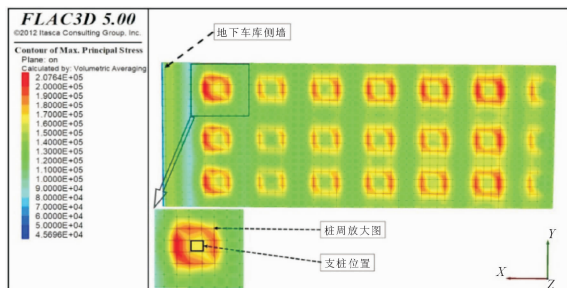


图 16 开挖完成后地下车库底板主应力分布

从分析结果可知,地下车库墙体连接锚杆处未发生明显位移应力增长也较小,与支护结构连接的侧墙上部受力变形均未发生突变。地下车库整体位

移最薄弱点位于墙体与底板交接处,受力最薄弱点为支柱。因此可认为该支护结构本身对地下车库影响较小,基坑开挖过程引起的土体变形对地下车库受力变形影响较大。在此类基坑在建设过程中要时刻注意周围建筑物支撑结构的受力变形情况。

4 结 论

本文通过分析与邻近地下结构物连接的桩锚支护系统的作用机理和应力应变规律,得出了该支护结构应力应变特征。具体研究成果总结如下:

(1) 地下车库的存在能够降低周围土体沉降量,支护桩水平位移呈现波浪形分布,支护桩桩身所受弯矩呈“弓”字型分布,最大位移发生在支护桩上部。

(2) 开挖完成后,最大水平位移发生在侧墙下部,地下车库靠近基坑一侧发生隆起,中部略有沉降,整体沉降量较小。墙体部位最大拉力发生在侧墙上部、最大剪应力发生在侧墙下部。支柱最大剪应力、侧墙部位剪应力与主应力呈现以支柱为中心向外部减小趋势、底板位置应力应变均随距基坑距离的增加逐渐减小。在基坑开挖过程中,地下车库侧墙连接锚杆处未发生应力集中和较大变形,地下车库最大受力构件为支柱,最大位移部位为侧墙底部。

(3) 对比分析得出,当基坑周围存在地下车库时,会对基坑侧壁以及支护桩后土体变形分布规律产生一定的影响,地下车库的存在减小了支护桩后土体体积使得支护桩变形量相对减小,基坑开挖也会使地下车库部分产生一定的受力变形。当基坑周围存在地下结构物时,将结构物靠近基坑一侧土体全部清除会使基坑侧壁变形减小,但会增加地下结构物受力变形,可能会对其产生不利影响。因此当邻近地下结构物强度较低时可保留基坑侧壁与结构物之间的土体,以缓冲应力传递,在一定程度上保证地下结构物安全。

(4) 通过与以往研究中传统桩锚支护结构桩身位移对比得出,地下车库是以荷载的方式作用于下部土体进而对支护结构产生影响的,地下车库的存在会对支护桩存在一定的影响区,影响区内会使支护桩位移增大,但支护桩最大位移仍然发生在支护桩上部,即周围建筑物的存在一定程度上影响支护

桩应力应变。

参考文献:

- [1] 李国栋,刘文丽,杨洪娜,等. 基于数值计算分析方法的地铁车站深基坑施工变形规律研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020, 18(2):221-224,225.
- [2] 彭超,余建民. 高压旋喷锚索与灌注桩支护结构三维数值分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018, 16(1): 194-197,206.
- [3] 文建鹏,赵笑鹏,姜晓迪. 珠海某混凝土内撑式支护结构深基坑监测与分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(2):99-103.
- [4] 张露露. 城市深基坑施工对周边环境的影响研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
- [5] 程良奎,张作媚,杨志银. 岩土加固实用技术[M]. 北京:地震出版社,2019:98-103.
- [6] 冯国春. 深大基坑施工对邻近建筑基础的影响分析[D]. 西安:长安大学,2019.
- [7] 羊科印. 基坑开挖对基坑及邻近建筑物的变形影响研究[D]. 西安:西安理工大学, 2019.
- [8] 周勇,朱乔红,朱彦鹏,等. “一桩两用”新型支护结构在某深基坑支护中的应用分析[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(S1):3168-3177.
- [9] 李连祥,白璐,陈天宇,等. 复合地基与临近基坑支护结构之间距离影响规律[J]. 山东大学学报(工学版),2019,49(3):63-72,79.
- [10] 马野,王瑞芳,雷颖. 基于Midas/GTS的深基坑数值模拟分析[J]. 山西建筑,2018(25):96-97.
- [11] 刘公然. 基于Midas GTS的深基坑开挖支护三维数值分析[J]. 广东土木与建筑,2018,25(7):43-45.
- [12] 徐勇,杨挺,王心联. 桩锚支护体系在大型深基坑工程中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2006(4):646-649,665.
- [13] 韩知霖. 深基坑对周边建筑结构的影响及应对措施[D]. 西安:西安工业大学,2017.
- [14] 邹玉强,刘超,王星运. 基坑开挖对邻近建筑物的影响数值分析[J]. 土工基础,2020,34(3):348-350,360.
- [15] Jiang B N, Ma J L, Chu J L, et al. New Design Calculation Method for “Zero-Occupancy” Foundation Pit Support Structure that Adjacent to Building [C]//The 7th International Conference, 2018.
- [16] 徐龙帅. 西安地区深基坑土钉墙-桩锚联合支护结构优化设计研究[D]. 西安:长安大学,2018.