

【水利水电工程】

基于 $FLAC^{3D}$ 的土钉支护结构变形分析

万林海^{1,2}, 王明龙², 张 健³, 黄志全², 郭 鹏²

(1 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2 华北水利水电学院 岩土工程系, 河南 郑州 450008;
3 原阳黄河河务局, 河南 新乡 453500)

摘 要:为进一步解释钉土的相互作用机理, 采用 $FLAC^{3D}$ 对土钉在开挖过程中的变形性能进行了模拟和分析。根据土钉支护结构的开挖、支护情况, 研究了基坑的整体变形、土钉的拉伸和剪切变形分布规律。指出: 基坑水平最大位移出现在基坑的中下部, 不在基坑的顶部; 土钉的轴向变形是不均等的, 土钉的轴向速度变化较大; 土钉两端的剪切位移明显大于中间的位移值, 中性点处位移为零, 该点逐渐靠近土钉面层方向; 土钉端部的径向变形量远大于底部的径向变形量。

关 键 词: 基坑; 土钉; 变形; 相互作用机理

中图分类号: TV223 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1379(2005)12-0068-02

土钉支护(经过土钉加固过的土体)是用于土体开挖和边坡稳定的一种挡土技术。它能充分发挥土体能量, 提高土体自身强度和自稳能力, 使土钉和边坡形成一个复合体, 确保施工安全和工程稳定, 具有良好的经济和社会效益^[1]。

目前, 工程中对土钉变形性能大多是依靠经验进行分析, 出现了理论滞后于工程实践的现象^[2]。研究钉土的相互作用机理, 重要的环节就是研究土钉变形, 而土钉变形与基坑稳定性密切相关。

笔者结合某基坑土钉实例, 在大变形条件下, 采用 $FLAC^{3D}$ 对土钉在开挖过程中的变形性能进行了模拟和分析。根据土钉支护结构的开挖、支护情况, 研究了基坑的整体变形及土钉的拉伸和剪切变形分布规律, 经过对比分析, 得到了基坑在开挖过程中土钉的位移变化规律。

1 土钉变形分析

根据土钉受力状态及结构特征, 土钉总位移是由土钉弹性变形、塑性变形、钢筋和砂浆体的切向变形以及土钉与周围土层切向变形等组成^[3]。土钉的塑性变形一般很小, 可以忽略。如果将土钉视为一个整体, 钢筋和砂浆体之间的剪切变形也可以不考虑。因此, 土钉的总位移可表示为

$$S = S_{ae} + S_{as}$$

式中: S_{ae} 为土钉的弹性变形; S_{as} 为土钉与周围土体的剪切变形。

1.1 土钉拉伸变形分析

笔者主要考虑土钉的受拉特性, 认为土钉的横向抗剪作用很微小, 可不考虑抗剪作用, 相应的土钉横向剪切变形也忽略不计。因此, 土钉的弹性变形主要指土钉的拉伸变形。

1.2 土钉与周围土体的剪切变形分析

对土钉进行受力分析, 土钉与土体相互作用时, 土体的轴力和剪力存在一阶导数关系, 并且当轴力最大时, 剪应力为零, 此点被认为是“中性点”。土钉所受剪应力的方向均背向中性

点, 其结论与无托盘锚杆的剪应力、剪切位移形状基本上一致^[4], 中性点右侧土体(稳定区)与土钉的剪切作用在基坑稳定中起着重要作用。

2 土钉支护结构变形的数值模拟

2.1 基本假定

土钉支护结构是平面应变问题; 土钉与土体作用的锚固力由土体位移产生, 若土体没有位移, 土钉不受力; 模拟过程中, 不考虑地下水影响; 不考虑土钉的横向抗剪、抗弯作用; 土钉与周围土体完全粘结, 满足变形相容条件; 钢筋和浆体为理想弹性体, 周围土体为理想弹塑性体, 服从摩尔—库仑强度屈服准则。

2.2 模型的建立及参数的选取

计算模型长 18 m、高 18 m、宽 2 m, 基坑的开挖深度为 7.5 m。模型共有 2 660 个单元, 4 212 个单元节点, 100 个结构单元。

模拟参数根据某基坑的勘察报告来选取(见下表 1)。

表 1 材料的物理力学参数

土层	模量 / MPa		泊松比	重度 / ($kN \cdot m^{-3}$)	内聚力 / kPa	内摩擦角 / ($^{\circ}$)
	体积	剪切				
1	8.3	2.38	0.35	18.0	10	15.0
2	11.0	3.33	0.35	19.5	16	21.5
3	13.0	3.80	0.35	19.7	16	22.0
4	12.5	3.57	0.35	19.6	16	22.5
5	13.0	3.10	0.35	20.0	17	22.0

收稿日期: 2005-05-24

基金项目: 河南省高校杰出科研人才创新工程项目(HA IP-URT), (2005KYCX015); 河南省高等学校创新人才培养工程项目。

作者简介: 万林海(1964), 男, 河南许昌人, 教授, 博士后, 主要从事岩土工程方面的教学和研究工作。

2.3 边界条件

模型的坐标系采用直角坐标系,坐标系原点取在模型基底的左下角。边界条件的设置采用模型周边侧向约束,不允许水平方向位移,底面约束允许铅直方向变形,底面采用固定支座,四面采用可动支座边界条件。

2.4 数值模拟

数值模拟完全按照施工的顺序,分 5 步开挖,开挖后进行土钉支护。基坑深 7.5 m,开挖角度为 82°;因此此角度对基坑安全系数的影响较为强烈^[5],土钉为钻孔注浆土钉,沿深度设置 5 排,每排土钉长度为 8 m,倾角均为 10°;每排土钉分为 20 个小单元,每个单元 0.4 m,并假设每个小单元内土钉的力学性质分布都是均匀的。采用大变形分别进行模拟,大变形理论计算结果比小变形理论计算更精确^[6]。强度准则采用摩尔—库仑准则和弹塑性本构关系。

3 模拟结果及分析

3.1 基坑位移分析

在基坑支护结构形成之后,随着基坑内土体的挖除,支护结构在背侧土压力作用下将产生向基坑方向的水平变位,同时地表出现沉降,而且因基坑内土体处于连续卸荷状态,坑底将发生回弹和隆起。另外,因为施工期间采取降水措施,地表又会因为水位下降,产生固结沉降。基坑开挖时地表沉降主要由墙体变位、基坑隆起及墙外地层固结沉降 3 种情况引起。软土中,前两种情况是主要的。

由于该基坑是沿 82° 开挖,所以模拟分析得出基坑边坡变形的最大值不是在基坑的顶部或上半部分,而是在下半部分。垂直开挖基坑的最大值变形在坡顶。

(1) 基坑水平位移分析。结合基坑顶部几个点的历史记录,经过开挖、支护后,顶部点的水平向位移随着施工的进行呈台阶状逐渐增加,最终处于一个平衡状态,端部基本上处于一个水平线。基坑在水平向的位移最大值发生在基坑中下部的地方,基坑中下部靠近开挖面处的等值线密度较大,说明此处的位移变化梯度较大,是基坑变形破坏的重要部位。基坑水平向位移最大值为 4.5 cm。从塑性区分布的角度出发,塑性区将从基坑底部沿一定的角度斜向上发展,最终贯通到顶部,基坑边坡将沿此贯通带发生破坏。在基坑顶部离基坑开挖面大约 9 m 处的水平向位移等值线基本上是垂直的,其值约为 1 mm。这表明基坑开挖过程中,基坑附近地面的沉降随距坑边距离的增加而很快衰减,此处及其以外的土体不受开挖影响。这和文献[7]中所提的结论不太一致,文献[7]中提出地面距离等于基坑深度时,水平位移几乎为零,而本研究中当距离等于基坑深度的 1.1 倍时沉降接近于零,原因是文献[7]中基坑是垂直开挖,本研究中是斜面开挖。在基坑底面下 11 m 处,仍有 3 cm 的水平位移,所以基坑底面以下土体变形同样受上部土体开挖的影响,其深度与土体强度有关。

(2) 基坑垂直位移分析。对于基坑的顶部,地面最大垂直沉降量位置在基坑最右边,最大为 1.9 cm,基坑边沿沉降量为 1.7 cm。究其原因,其一是基坑斜面开挖,其二是第 1 排土钉的作用,土钉轴力分布呈抛物线形状,使得土钉中部等值线

图出现单驼峰的形状,端部等值线下降。开挖支护后,基坑底部位移向上隆起最大,最大值在基坑的中心,为 10.4 cm,从中心到基坑开挖坡脚逐渐减小。基坑顶部边沿向下的位移矢量最大。基坑中下部等值线较密,应力集中,垂直变形较小。

3.2 土钉位移分析

(1) 沿土钉全长范围内,土钉变形是不均等的,它包括土钉拉伸变形和土钉与周围土体的剪切变形。各排土钉端点的位移依次为 1.371、1.044、7.890、5.865、4.060 mm。可以看出,第 1 排土钉的变形量最大,从上往下依次逐渐减少。水平位移若以基坑深度的百分比表示,通常为基坑深度的 1‰~3‰。而本研究中模拟结果的最大值为 1.39‰,在此范围内,满足要求。

(2) 针对每一排土钉而言,其轴向变形也是在不断变化的,距土钉端部 0.8 m 处的位移量最大,土钉端部的变形量却小于这个值。究其原因有三点:一是该模拟没有考虑面层的作用;二是开挖卸荷以及边坡的斜面开挖导致土钉端部产生的临空面;三是土钉端部 0.8 m 处的不平衡力最大。

(3) 土钉的轴向速度差别较大,速度是每步数的位移量,每排土钉端部速度相对较大,总体上看第 5 排的速度最大,前 3 排土钉的速度相差不大。

(4) 垂直于土钉方向,即土钉的径向,土钉的变形量差异很大。整体上看,土钉端部的变形量远大于底部的变形量,这和基坑开挖卸载产生临空面的作用有关。土钉端部的径向速度也明显大于其他部位的速度值。第 2 排土钉的径向变形量最大,第 5 排土钉的变形量最小,第 2、3 排土钉沿径向的变形量分别相差 1.508 cm、1.570 cm,产生原因是上部土的性质较差及基坑开挖的卸荷作用。

(5) 土钉两端的剪切位移明显大于中间的位移值,中间部分位移值为零。由于土钉中性点右侧的土体为土钉提供抗拔力,所以土钉的剪应力、剪切位移是正的;而中性点左侧的土钉是阻止滑动区的土体向外滑动的,则受到负向的剪应力,得到的位移值是负值。每排土钉剪切位移为零的点,逐渐向面层方向靠近,这和土钉剪应力的特征是相一致的,此时的剪切位移和无托盘锚杆的剪切位移形状很相似,表明两者的工作机理是相似的。第 1 排土钉尾部的剪切位移最大,第 3 排土钉的剪切位移端部最大。

4 结 论

(1) 在土钉受力的情况下,分析钉土的相互作用,得出了土钉的变形和变形速率分布规律,进一步解释了钉土相互作用的机理。

(2) 由于该基坑工程是沿斜面成 82° 开挖,所以基坑水平最大位移出现在基坑的中下部,不是在基坑的顶部。

(3) 土钉的轴向总变形是不均等的,在距土钉端部 0.8 m 处的位移量最大,土钉端部的位移量却小于这个值;土钉两端的剪切位移明显大于中间的位移值,中间部分位移值为零,每排土钉剪切位移的零点,逐渐靠近土钉面层。

(4) 土钉径向变形差异较大。土钉端部的变形量远大于底部的变形量,这和基坑的开挖卸载产生临空面的作用有关。

(5) 基坑边坡内土体质点的移动是基坑 (下转第 71 页)

(1) 加大截面法。故县水库机架桥面布置有启闭机设备, 主梁高度较大且腹板存在大量裂缝。若增大梁高, 将影响启闭机布置和运用; 若增大梁底面和腹板两侧混凝土截面面积, 则新、老混凝土间结合及联合受力困难和翼板下混凝土浇筑困难。因此, 不考虑采用增大混凝土截面法加固。

(2) 改变结构传力途径法。这种方法通常是在梁底部增设支点或在闸墩上设塔架—斜拉索和在桥跨上设拱—吊索等结构, 改变结构传力途径, 但受梁底空间和启闭设备位置的限制, 这种方法也难以实施。

(3) 置换法。这种方法不受原梁条件的限制, 处理较为彻底, 但这种方法需要大型施工设备多, 专业化施工技术水平及质量要求较高, 工程量较大, 费用较高, 施工难度大、工期长, 汛前难以完成。

(4) 预应力加固法。考虑 1999 年应急加固工程抗剪能力因无条件卸荷而补强不足的实际情况, 采用体外斜向预应力索增强有缝截面的抗剪能力, 即对梁某部位施加一对斜向压力, 使梁上一定范围的截面上产生一个与荷载作用方向相反的预剪应力, 以弥补原截面抗剪能力的不足。这种方法由于其加固技术成熟, 施工方便, 不需拆除启闭机设备, 工期短, 工程量及费用相对较少, 且加固效果可以达到规定的设计安全要求, 因此确定采用本方案。

2.2.2 方案设计

根据补强的要求, 预应力锚杆斜向对称布置在大梁两端的高剪力区腹板体外侧, 斜向夹角为 60° 左右, 梁顶、底部布置钢支座, 预应力锚杆对拉产生的斜向预应力的垂直分力可抵消由荷载产生的截面剪力, 从而满足截面抗剪要求。

根据启闭机桥未处理时能起吊空门运用的情况, 认为此时是临界安全状态。设计状况与未处理大梁起吊空门临界状态截面的剪力差值, 即为需施加预应力补足的剪力值。经对 1 号、3 号梁进行设计计算, 预应力体外索材料采用 40 SiMnV (或 45 SiMnV) 精轧螺纹钢, 可以满足锚杆安装的刚度要求, 其极限抗拉强度可达 1100 MPa 。

3 加固的方法、步骤及工艺技术措施

3.1 应急加固方法、步骤及工艺技术措施

(1) 裂缝表面处理。先用钢丝刷等工具清除裂缝表面的灰

尘、白灰及松散层, 再用毛刷蘸丙酮把裂缝两侧 $20 \sim 30 \text{ mm}$ 范围擦洗干净, 并保持清洁。

(2) 埋灌浆嘴。沿裂缝走向布设灌浆嘴, 用结构胶将灌浆嘴直接粘贴在混凝土表面。

(3) 封缝。对注浆嘴之间的裂缝部位, 沿缝抹一层结构胶封缝。

(4) 气压实验。其目的一是检查封缝效果, 二是观察灌浆嘴之间的连通情况。

(5) 配胶灌浆。配置胶液时应根据裂缝情况决定稀释剂用量, 灌浆工作压力一般在 $0.3 \sim 0.5 \text{ MPa}$, 待上部灌浆嘴出浆后, 维持工作压力 $2 \sim 3$ 分钟, 再用棉纱封闭。

(6) 粘钢加固。工艺流程为: 混凝土和钢板表面处理、配胶、涂胶、粘贴、加压、固化、质量检查。

3.2 永久加固方法、步骤及工艺技术措施

(1) 重要工程项目控制标准。翼板钻孔: 要求位置准确、角度准确, 钻孔角度确保 62° 。钢支座制作: 钢料要平整、无锈, 尺寸符合要求, 焊缝符合标准。钢板粘贴: 粘贴面积大于 95% , 若粘贴面积在 $90\% \sim 95\%$ 之间或局部缺胶面积大于 $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ 时, 需做补胶处理。预应力锚杆张拉: 分批、对称张拉, 两台千斤顶同时工作, 张拉差值控制在 5% 以内, 分级加荷 50 kN , 稳压持荷 2 分钟; 超张拉系数 1.05 , 稳压持荷 3 分钟; 加荷速率每分钟小于设计张拉力 $1/10$, 卸荷速率小于张拉力的 $1/5$ 。

(2) 关键技术的工艺流程: 翼缘钻孔流程为放样、定位、钻孔、凿毛混凝土; 钢件制作流程为放样号料、刨边修正、焊接; 粘钢流程为混凝土及钢板表面处理、试粘、配胶、涂胶、加压粘钢、锚杆张拉、加工锚杆、喷铝、锚杆安装、张拉、锚固和放张。

4 加固措施的效果

自 2000 年安全加固投入运用至今, 经每年汛前、汛后检查, 未发现新的裂缝, 原有裂缝也没有进一步发展。特别是经过 2003 年、2005 年 50 年一遇洪水的考验, 在历史最高水头作用下, 机架桥大梁运行可靠稳定, 说明加固措施正确, 加固效果良好。

【责任编辑 张智民】

(上接第 69 页) 边坡地表沉降、水平位移和基底隆起等外部现象的内在原因。由于钉土的相互作用, 有效地分散了土体内部的应力, 使基坑变形大幅度减小, 基坑稳定性明显提高。

参考文献:

- [1] 曾宪民, 黄久松, 王作民, 等. 土钉支护设计与施工手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 秦四清, 王建党. 土钉支护机理与优化设计 [M]. 北京: 地质出版社, 1999.
- [3] 张友葩, 高永涛, 吴顺川. 预应力锚杆锚固段长度的研究

- [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (6).
- [4] 杨双锁, 康立勋. 锚杆作用机理及不同锚固方式的力学特征 [J]. 太原理工大学学报, 2003, (5).
- [5] 万林海, 余建民, 冯翠红. 软土复合土钉支护结构参数优化设计 [J]. 岩土力学与工程学报, 2004, (19).
- [6] 王广国, 杜明芳, 侯学渊. 深基坑的大变形分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2000, (4).
- [7] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用 (第二版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

【责任编辑 张华岩】