

# 外有堆载的箱涵深基坑桩锚支护合理形式研究

赵春荣<sup>1</sup>, 崔 炜<sup>2</sup>

(1. 北京工业职业技术学院, 北京 100042; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

**摘要:** 采用有限元法模拟分析了在较大坑外堆载条件下, 桩锚支护箱涵深基坑的受力规律, 并通过对比四种桩锚方案的支护结构受力状况和过程, 探讨了不同应力特点对支护结构的影响。结果表明, 堆载对基坑上层土体产生了很大的侧向压力, 因此把首层锚索尽可能地设置在护坡桩顶, 并予以加强, 可以有效地控制桩的位移和内力, 而增设双排桩对改善支护结构内力的效果不显著, 不建议采用。另外, 锚桩受到地层的约束较弱, 在水平拉力下几乎呈平动, 未能有效起到锚的作用, 因此也不建议采用。

**关键词:** 基坑; 堆载; 桩锚; 箱涵; 有限元

**中图分类号:** TU55    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2014)04-0202-03

## Study on the Rational Form of Pile anchor Retaining Structures to a Deep Box Culvert Pit with Large External Surface Load

ZHAO Chunrong<sup>1</sup>, CUI Wei<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China; 2. Department of Structures and Materials, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In this paper, the structural force status of a pile anchor retained deep box culvert pit with a large external surface load was simulated using the finite element method. Four retaining schemes were studied, and the force and loading process of the supporting structure under each scheme were compared to investigate the impacts of different stress characteristics on the supporting structure. The results showed that the surface load can cause a large lateral stress on the upper pit, and therefore the first level cable should be strengthened and set on the pile top, which can effectively limit the displacement and inner force of the pile. The double row pile did not improve the inner force of the pile, thus it was suggested not to be applied. Moreover, the anchor pile was also not suggested due to that it is weakly constrained and translational displacement occurs with the horizontal pull from the cable force.

**Key words:** pit; surface load; anchor pile; box culvert; finite element method

岩土工程中常遇到桩在侧向堆载作用下的结构安全评价问题。地面堆载将引发土层侧向位移, 进而引发桩结构挠度和内力, 若桩变形过大, 将引发结构失效事故。目前, 对此类问题做深入研究的以桩基础居多<sup>[1,2]</sup>, 基坑支护桩偏少<sup>[3,4]</sup>。桩锚支护是深基坑一种重要的支护形式, 但是关于外有堆载的基坑桩锚支护受力过程的研究成果, 公开发表的很少。本文以箱涵深基坑工程为实例, 在外有较高堆载、地层较弱的基坑中采用的4种桩锚支护方案, 使用有限元法分析坑外堆载边坡造成的初始地应力状态, 模拟基坑的分层开挖和支护过程, 并通过对比分析4种支护方案的结构位移、

内力状态和过程, 提出合理的支护方案。

## 1 工程概况

### 1.1 工程地质概况

箱涵基坑开挖深度为10.5 m, 拟采用桩锚支护。在支护桩顶高程以上, 距离基坑边缘10 m远有一个坡度为1:1.2的回填土坡, 高8 m。该边坡是因场地空间不足而临时堆填的弃土, 自身未固结, 但是对基坑原始地表形成较大压力, 对基坑开挖支护造成不利影响。基坑自桩顶向下的岩土层分布如下: 1 m厚的回填土、9 m厚的淤泥质黏土、3 m厚的黏

收稿日期: 2013-11-20    修回日期: 2014-04-10    网络出版时间: 2014-06-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.04.001.html>

基金项目: 北京工业职业技术学院2013年院级科研课题“深基坑支护施工全过程仿真系统的开发”(bgzyky201362); 水利部公益性行业科研专项“水利水电专业软件平台开发”(201201050)

作者简介: 赵春荣(1980), 女, 河北邯郸人, 讲师, 硕士, 主要从事建筑工程、岩土工程等领域的教学与科研工作。E-mail: chunrongzhao428@163.com

土、基岩,其中深厚的淤泥质黏土强度较低。在基坑开挖前,采用高压旋喷加固坑底至基岩之间的黏土,作为箱涵的地基,对护坡桩能起一定的侧向约束作用。基坑岩土体的分布见图1(a),各土层与水泥土的力学参数见表1,其中旋喷水泥土的参数是依据地质勘查部门所做的水泥土试验,并参考了文献<sup>[5,9]</sup>的试验成果之后给出的。

### 1.2 支护形式

由钢筋混凝土灌注桩和预应力锚索组成基坑支护体系。桩直径为1 m,长15 m,间距1.5 m,桩底进入基岩0.5 m。锚索水平向间距1.5 m,与水平向夹31°角,上、下层锚索分别长28 m、21 m。每条锚索由3根7Φ5钢绞线组成,灌浆锚固段位于黏土和基岩内,设计承载力为450 kN。向锚索施加的预应力为承载力的70%。考虑在桩顶高程设置水平拉杆(2Φ22钢筋),连接护坡桩和远端锚桩。锚桩直径1 m,长6 m。拟采用的四种支护方案见图1,具体如下。

方案一,低锚索方案。锚索设置在-3.5 m、-7.0 m高

程,设锚桩和水平拉杆。

方案二,高锚索方案。锚索提高至0.0 m、-6.0 m高程,设锚桩和水平拉杆。

方案三,高锚索、无拉杆方案。锚索位置与方案二同,上层锚索加粗至5根7Φ5钢绞线组成,取消锚桩和水平拉杆。

方案四,低锚索、双排桩方案。锚索设置与方案一相同,护坡桩后设置与其直径相同的另一排桩,两排桩的轴心距离为2.2 m,无锚桩和水平拉杆。

表1 岩土体的力学参数

Table 1 Mechanic properties of rock and soil

地层名称	比重 /( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	变形模量 (MPa)	泊松比	C (kPa)	$\varphi$ (°)
回填土	20.00	30.0	0.20	10.0	28.0
淤泥质黏土	18.00	4.88	0.40	9.0	5.0
黏土	20.00	5.53	0.32	20.0	14.5
旋喷水泥土	19.00	400	0.28	100.0	20.0
基岩	26.00	5 000	0.27	3 000.0	40.0

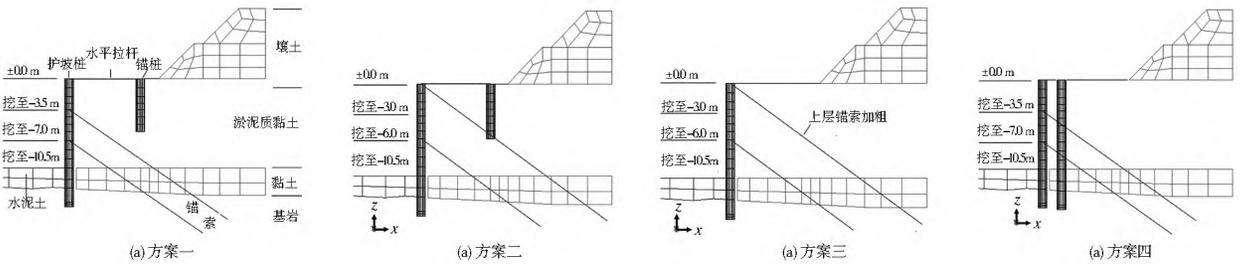


图1 拟采用的四种桩锚支护方案

Fig. 1 Four proposed retaining schemes of pile anchor

## 2 计算模型

本文采用有限元软件 ABAQUS 建立单个桩间距范围内的三维有限元模型,并进行了岩土、支护结构的材料分区和施工步分区(图1)。岩土体单元延伸到模型边界,模型边界距离桩80 m,约为由堆载体顶至基坑底深度的4倍。岩土体采用实体单元,桩用梁单元,锚索和拉杆采用不承压的杆单元。桩单元与岩土单元共用节点,二者的平动位移相同。锚索的锚头节点与桩节点共用,自由段与岩土不发生作用,通过 ABAQUS 的单元埋置功能实现锚固段单元与其所在岩土单元位移协调<sup>[7]</sup>。岩土材料采用弹塑性本构模型、MHORCOULOMB 屈服准则,混凝土和钢材采用线弹性模型。

在基坑开挖的模拟过程中,首先生成自重和堆载作用下的初始地应力场,然后激活桩单元;此后,依据施工顺序移除土单元来模拟开挖,激活锚索单元并施加预应力,来模拟锚索施加。岩土开挖共分为3层见图1,锚索施加分为2次,连同初始场共设置6个计算步。

## 3 成果分析

### 3.1 有堆载影响的初始地应力

外有堆载的基坑上层土的初始地应力场主应力矢量见图2,可以看出,基坑上层土中的水平向应力大于垂直向应力,这与坑外无堆载的静止土压力状态恰好相反。说明基坑在开挖以前,堆载体对基坑上层土体中产生了较大的侧向压力。

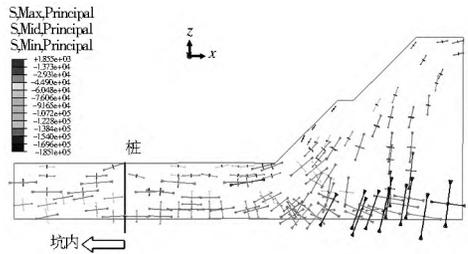


图2 外有堆载的基坑上层土的初始地应力场主应力矢量(Pa)

Fig. 2 Initial principal stress vector of ground stress field of upper pit under the external surface load (unit: Pa)

### 3.2 各方案的结构变形和内力情况

方案一的两层锚索设置在桩的中上和 中下部,桩的水平位移随施工的变化见图3。可以看出,桩顶水平位移最大,沿高程向下逐渐减小,桩底因嵌岩而位移极小。基坑开挖结束时,桩顶的水平位移为130 mm。桩在受基岩约束处产生很大的负弯矩,约3 600( $\text{kN} \cdot \text{m}$ ),难以实现配筋设计。造成这种情况的主要原因如下:坑外堆载在基坑上层土中造成了较大的侧压力,上层土开挖时无锚索,桩几乎处在悬臂状态,此时桩的大部分变形和内力已形成。第二、三层开挖时,有了锚索约束,桩的变形和内力增加较少。桩弯矩随开挖的变化情况见图4,主要表现为负弯矩。由以上规律可知,对于坑外有堆载的基坑,把第一层锚索或首层内支撑尽可能设置在桩顶高程,对控制桩的位移和 内力是十分必要的。上、下层锚索承受的拉力为435 kN和340 kN,小于设计承载力。水平拉杆的拉力为103 kN,约为设计承载力的一半。由于锚桩

设置在边坡位移显著变化区域内, 在外力作用下几乎呈平动, 内力较小, 未有效起到“锚”的作用。

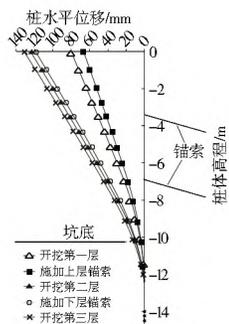


图 3 方案一桩的水平位移随施工的变化

Fig. 3 Variation of horizontal displacement of pile with construction under scheme 1

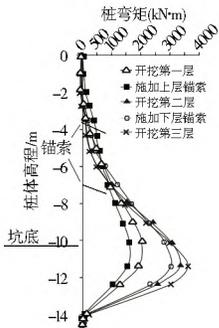


图 4 方案一桩弯矩随施工的变化

Fig. 4 Variation of pile moment with construction under scheme 1

方案二把首层锚索设置在桩顶, 桩体的位移情况见图 5, 由于顶层锚索在开挖前即施加, 桩体的位移仅为方案一的 41%。桩在基岩处的负弯矩为 2 240 kN · m, 在上下锚头之间的正弯矩为 980 kN · m 见图 6, 数值仍然较大。上、下锚索的拉力为 488 kN 和 330 kN, 上层锚索拉力超过设计承载力。水平拉杆的拉应力为 57 kN, 比方案一小了近半。可见, 本方案水平拉杆和锚桩的作用更加微弱。因此, 在加强上层锚索的前提下, 可取消水平拉杆和锚桩的设置, 以减少造价。

方案三将桩顶锚索加粗至 5 根 7Φ5 钢丝绳, 取消锚桩和水平拉杆。桩体水平位移情况见图 5, 可以看出上、下锚头中间位置的水平位移最大, 其值为 23 mm, 桩呈“鼓肚”趋势, 桩的位移比方案一、二显著减小。桩弯矩的分布规律与方案二相似, 负弯矩比方案二减小了 35%, 变为 1 470 kN · m; 正弯矩比方案二增大了 21%, 变为 1 190 kN · m, 能够实现配筋设计。该方案正、负弯矩值接近, 桩的受力更加合理, 易对称配筋。上、下层锚索的拉力均小于其设计承载力。

方案四双排桩的最终位移情况见图 5, 前、后桩顶向坑内“探头”, 前、后桩的桩顶位移分别为 90 mm 和 83 mm, 比方案一减小了近 34%。桩内力分布与方案一相似, 前、后桩均承受负弯矩见图 6, 分别为 2 490(kN · m) 和 1 990(kN · m), 比方案一减小了近 40%, 但数值仍然较大, 难以实现配筋。

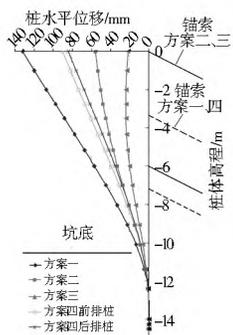


图 5 四种方案桩水平位移比较 Fig. 5 Comparison of pile horizontal displacement under four retaining schemes

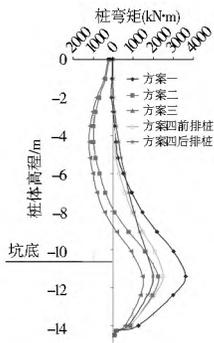


图 6 四种方案桩的弯矩比较 Fig. 6 Comparison of pile moment under four retaining schemes

### 3.3 方案对比及优选

对于外有较大堆载的深基坑, 方案一因锚索位置偏低而导致桩变形和内力过大。方案二虽然把顶层锚索上调至桩顶, 锚索因拉力大、截面小而导致承载力不足。方案四使用了双排桩方案, 桩的受力优于方案一, 但是劣于方案二、三, 而且建造后排桩的费用高于加强上层锚索。

方案三是在方案二的基础上加粗了顶层锚索、取消了锚桩, 该方案锚索所受的拉力最大, 但桩的弯矩最小, 说明该方案由锚索承担了更多的土压力, 减少了桩的内力。由于锚索锚入基岩, 达到较高承载力是能够保证的。桩的正负弯矩值接近, 易于实现对称配筋设计。因此, 方案三的支持结构受力最合理, 造价最经济。

## 4 结论

本文对抗外有堆载的箱涵深基坑, 采用桩锚支护的受力过程和状况进行详细地模拟分析, 得出以下认识。

- (1) 外有堆载的基坑尚未开挖时, 堆载在基坑上层土体中已造成了较大的侧向压力。若首层锚索设置在桩顶以下较深处, 在开挖上层土时, 桩几乎处在悬臂状态, 桩将产生过大的变形和内力, 给配筋设计带来困难。把首层锚索尽可能地设置在桩顶, 并予以加强, 对控制桩的位移和内力是十分必要的。
- (2) 锚桩受到地层的约束较弱, 在水平拉力作用下几乎呈平动, 即使锚桩做得很长, 其仍几乎处在悬臂状态, 对护坡桩的拉结作用有限, 与其造价不成正比, 不建议采用。
- (3) 双排桩方案因锚索位置较低, 桩受力状况仍劣于在桩顶设强锚索的方案, 而且后排桩的造价高于加强锚索, 不建议采用。
- (4) 在桩顶设置强锚索、取消锚桩的方案, 由锚索承担了更多的土压力, 减少了桩的内力。桩的正、负弯矩值接近, 受力合理, 易于进行对称配筋设计且节省造价。

### 参考文献 (References):

[1] 陈福全, 杨敏. 地面堆载作用下邻近桩基性状的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1286-1290. (CHEN Fuquan, YANG Min. Numerical Analysis of Piles Influenced by Lateral Soil Movement Due to Surcharge Loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1286-1290. (in Chinese))

[2] 李忠诚, 梁志荣. 大面积堆载土体侧移模式及对邻近被动桩影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S1): 128-134. (LI Zhongcheng, LIANG Zhirong. Calculation Model and Numerical Analysis of Passive Piles Subjected to Adjacent Surcharge Loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 15(01): 98-102. (in Chinese))

[3] 姜晨光, 王辉, 方丽娟, 等. 堆载对基坑侧压力影响的引力算法与初步实践[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(3): 31-35. (JIANG Cheanguang, WANG Hui, FANG Lijuan, et al. Calculating Method and Initial Practice on the Influence of the Stacked Heavy Load at Ground on Pit wall Soil Pressure of Foundation Pit Based on Gravitational Field[J]. South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2009, 7(3): 31-35. (in Chinese))

(下转第 208 页)

当或达不到增产作用、或造浪费,因此合理施肥是实现高产、稳产、低成本且环保的一个重要措施。本文通过对冬小麦施用氮肥、磷肥、钾肥不同用量对比分析,发现在其他条件相对稳定情况下,氮肥(折纯量)是用量 210 kg/hm<sup>2</sup> 产量最高;磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)施用量在 45~75 kg/hm<sup>2</sup> 即可满足冬小麦 6 750 kg/hm<sup>2</sup> 以上的需求;钾肥(K<sub>2</sub>O)施用量为 22.5~45 kg/hm<sup>2</sup> 之间,可使冬小麦产量 6 750 kg/hm<sup>2</sup> 以上。试验结果可为该区域在农业生产中合理施用肥料提供科学依据,对提高农业生产效率将发挥重要作用。

#### 参考文献(References):

- [1] 郑红. 石津灌区节水现状与发展对策[J]. 河北水利水电技术, 2001(6): 6-7. (ZHENG Hong, Shijin Irrigation District Water Saving Situation and Development Strategy[J]. Hebei Water Resources and Hydropower Engineering, 2001(6): 6-7 (in Chinese))
- [2] 谭金芳. 作物施肥原理与技术[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. (TAN Jinfang. The Principle and Technology of Crop Fertilization[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. (in Chinese))
- [3] 陈伦寿, 李仁岗. 农田施肥原理与实践[M]. 北京: 农业出版社, 1984. (CHEN Lunshou, Li Ren gang. Principles and Practice of Irrigation and Fertilization[M] Beijing: Agricultural Publishing House, 1984(in Chinese))
- [4] 鲁如坤, 史陶钧. 农业化学手册[K]. 北京: 科学出版社, 1982. (LU Rukun, Shi Taojun. Handbook of Agricultural Chemistry[K] Beijing: Science Press, 1982(in Chinese))
- [5] 钱晓刚. 化肥施用技术[M]. 贵阳: 贵州科学技术出版社, 1999. (QIAN Xiaogang. Fertilizer Application Technology [M]. Guiyang: Guizhou Science and Technology Press, 1999. (in Chinese))
- [6] 刘喜民. 肥料合理使用新技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005. (LIU Ximin. Rational use of new Technology of Fertilizer[M]. Agricultural Publishing House, 2005(in Chinese))
- [7] 陆景陵, 胡霭堂. 植物营养学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2003. (LU Jingling, Hu Aitang. Plant Nutrition[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2003. (in Chinese))
- [8] 张德荣, 王静, 王红霞, 等. 钾肥在植物生长中的作用及其对武安市玉米生产的影响[J]. 现代农业科技, 2011, (7): 313-317. (ZHANG Derong, WANG Jing, WANG Hongxia, et al. Effect of Potassium Fertilizer on Plant Growth and Its Role in Maize Production of Wuan City[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2011, (7): 313-317. (in Chinese))
- [4] 林刚, 徐长节, 蔡袁强. 不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2592-2598. (LIN Gang, XU Changjie, CAI Yuanqiang. Research on Characters of Retaining Structures for Deep Foundation Pit Excavation under Unbalanced Heaped Load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2592-2598. (in Chinese))
- [5] 李小杰. 高压旋喷桩复合地基承载力与沉降计算方法分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1499-1502. (LI Xiaojie. Analysis of Calculation Methods for Bearing Capacity and Settlement of High pressure Chemical Churning Pile Composite Foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1499-1502. (in Chinese))
- [6] 孙星亮, 王海珍. 水平旋喷固结体力学性能试验及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(10): 1695-1698. (SUN Xingliang, WANG Haizhen. Testing on Physical and Mechanical Properties of Horizontal Jet grouted Soilcres[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(10): 1695-1698. (in Chinese))
- [7] ABAQUS MANUALS[M]. Dassault Systèmes Simulia Corp, 2010.

(上接第 204 页)