

竖井开挖过程的数值模拟分析

代 鑫, 徐 伟, 邹 丽, 申青峰

(同济大学建筑工程系, 上海 200092)

摘 要: 通过对某水电站双竖井施工阶段进行有限元数值模拟, 对开挖过程中的井壁应力、应变及土体变形规律进行了分析, 并对施工的安全性进行了初步的评估。结果表明: 竖井的受力形态呈现出悬臂梁的受剪状态, 随着开挖深度增加, 土体沿井侧变形增大, 在深度超过 90 m 后, 竖井的井口处土体变形不再明显。工程采用的“边开挖边支护”的施工方案是符合安全储备的。

关键词: 竖井; 数值模拟; 有限元; 受力分析

中图分类号: TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2012)S0-0154-04

作者简介: 代 鑫(1989-), 男, 四川成都人, 硕士研究生, 从事沉井设计与施工研究。E-mail: dx419477423@qq.com。

Numerical simulation of shafts during excavation process

DAI Xin, XU wei, ZOU Li, SHEN Qing-feng

(Department of Building Engineering of Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Through the finite element numerical simulation of dual-shaft of a hydropower station during the construction stage, the stress and strain of sidewall and the deformation laws of soils during excavation are analyzed, and the safety of construction is preliminarily assessed. The results show that the mechanical conditions of the shafts demonstrate the shear state of cantilever. With the increase of the excavation depth, the deformation of soils increases along the side of the wells, while the depth exceeds 90 m, the deformation of soils at the wellhead of the shafts is no longer obvious. The project using the “supporting while excavating” construction program complies with the safety margin.

Key words: shaft; numerical simulation; finite element; stress analysis

0 引 言

随着我国资源开采难度的加大和工程建设水平的不断提高, 水利水电、煤矿及隧道工程中的竖井也正朝着超深、超大直径方向发展, 并且越来越多的竖井工程需要建设在含有不稳定含水率的厚表土层覆盖地区, 这就对深覆土层地质条件下竖井结构受力和变形特点的研究提出了更高的要求。尤其是在开挖过程中井壁的应力、应变规律以及土体的变形规律, 这对于促进竖井更加安全可靠的设计施工具有重要意义。

目前, 我国的竖井施工深度已超过 700 m。以往针对覆土层竖井结构采用的设计方法通常是将其井壁和内衬简化为板或壳来处理; 而采用空间有限元方式, 以实体单元进行受力分析模拟的情况还较少。

本文采用 ABAQUS 大型工程模拟软件, 通过对某水电站双竖井施工阶段进行有限元数值模拟, 分析其在开挖过程中的井壁应力、应变及其土体变形规律, 对施工的安全性进行了初步的评估。

1 工程概况

某水电站左岸出线的#1、#2 竖井工程, 内径均为 10 m, 竖井总深度为 488.5 m。左岸竖井在高程 614 m 和 607 m 布置有交通联系平洞与右岸相关工程相连, 将竖井分为上下两段布置, 上段深度为 251 m, 其中覆盖层厚度为 59.64~166.9 m。竖井井壁现场分段浇注, 留设结构缝, 混凝土强度等级为 C35。根据钻孔取样检测, 左岸竖井覆盖层由下至上, 从老到新依次为古滑坡堆积体、冰川冰水堆积体和洪积堆积体。该工程覆盖段地质剖面高程见图 1。

2 有限元模型建立

2.1 物理参数

根据基础资料中所提供的左岸出线竖井岩土物理力学参数建议值, 将覆土简化为厚度分别为 33, 42 和 45 m 三层, 土层计算参数如表 1 所示。

表 1 土层计算参数表

Table 1 Calculation parameters of soil

土体类型	洪积堆积体	冰川、冰水堆积体	滑坡堆积体
天然密度/(g·cm ⁻³)	2.00	2.35	2.25
弹性模量/MPa	60	120	80
内摩擦角/(°)	16	30	27
黏聚力/MPa	0.015	0.05	0.05
土层厚度/m	33	42	45

土层本构考虑莫尔-库仑弹塑性模型,井壁 C35 混凝土按弹性考虑,弹性模量 $E_c=3.15\times10^4$ MPa,泊松比 0.2,密度综合考虑钢筋混凝土取为 2600 kg/m^3 。

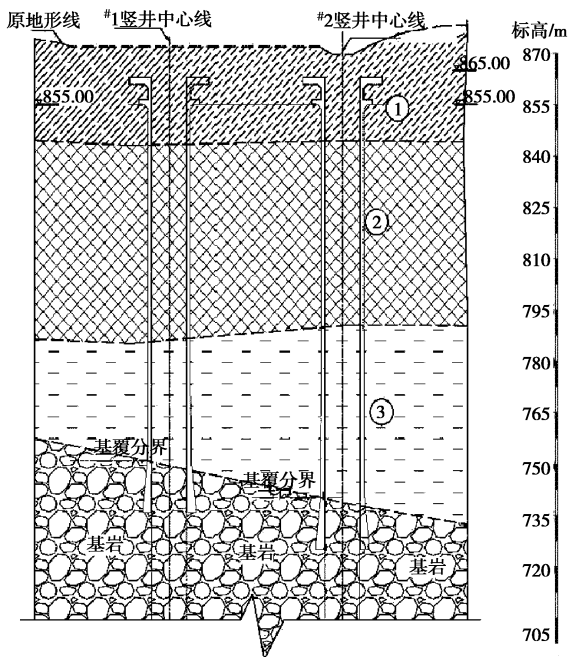


图 1 某竖井工程覆盖段地质状况

Fig. 1 Geological conditions of covering section of shafts

2.2 几何模型

竖井结构简化为圆筒模型,在半无限体假设下分析土域为 $210\text{ m}\times140\text{ m}\times120\text{ m}$,即平面各尺度取为边界距井口 10 倍竖井外径尺寸,深度取基岩上覆土的平均厚度。土体与井壁均采用六面体单元 C3D8R。计算模型如图 2 所示。

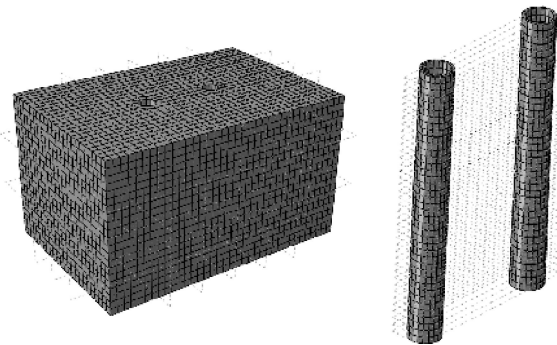


图 2 土体与竖井有限元模型

Fig. 2 Finite element model for soils and shafts

3 竖井开挖过程的有限元模拟

3.1 竖井施工的基本过程

出线竖井覆土层开挖采取“边挖边衬砌”的施工方 案。先开挖井口部分,边开挖边支护。开挖支护完成后,及时进行井圈混凝土的施工,竖井开挖、支护及混凝土浇筑施工循环进行,开挖一层衬砌一层。在 施工过程中,若开挖所揭示的围岩类别较好、稳定性 较强,混凝土施工可滞后开挖、支护作业 1~2 个循环。

竖井施工过程中大致的力学过程可以作如下表 达:初始应力状态→(开挖)→开挖后应力状态→(支 护)→支护体系应力状态→(时间)→最终应力状态。

3.2 竖井开挖过程模拟中几个问题的处理

使用有限单元法模拟自重作用下竖井开挖过程 时,需要考虑以下几个问题:①初始应力场平衡;② 土体开挖后的应力状态;③支护结构的力学动态。

(1) 初始地应力的模拟

当采用只考虑竖井和土体自重应力作用、忽略土 层本身的构造应力假设时,在进行开挖计算的第一步, 应首先计算土体的自重应力场,获得土体在自重作用 下的初始位移。这个位移是在土体最初形成直到今天 的漫长时光中,随着土体固结而发生的沉降,它对竖 井开挖没有影响,因此在后续的施工过程模拟中,需 要在位移场中减去初始位移场。

本文模拟地应力平衡结果如图 3 所示,土体应力 分层均匀,从上至下递减,最小地表应力为 0.0192 MPa ,最大应力在模型底层为 1.448 MPa 。

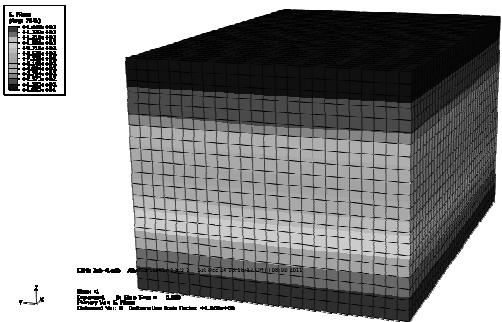


图 3 土体初始应力状态

Fig. 3 Initial stress state of soils

(2) 加载边界

计算范围的外边界可采取 3 种方式处理:位移边 界条件、应力边界条件和混合边界条件。在进行了地 应力平衡的基础上,本文模型采用位移边界条件约束 土体 4 个边界侧面和底面竖向位移。

(3) 土体开挖与井壁施工模拟

随着基坑在每一个步长的开挖,土体的原有应力 平衡被打破,趋向于沿着最短距离向自由表面方向移

动,使土体内应力重新分布直至达到新的平衡,即所谓的二次应力场。在实际工程中,土体开挖完成后立即施工竖井支护,因此,土体应力释放过程只进行了一部分,便进入了与支护结构共同作用阶段。

本文采用控制单元生死的 `remove` 和 `add` 语句,实现基坑土体的开挖和井壁的生成,同时通过控制被开挖土体的模量衰减,以模拟土体开挖和衬砌施工过程中周围土体应力释放现象。

(4) 连续施工的模拟

本文参照实际施工过程,以 3 m 为一个开挖步,共 40 个开挖过程,每个开挖步包括开挖土体模量衰减、竖井井壁激活、移除开挖土体几个子步骤。

4 有限元计算结果与分析

4.1 竖井结构计算结果

(1) 竖井最终应力及变形状况

从表 2 和图 4 可以看出竖井的受力形态呈现出悬臂梁的受剪状态—最大剪应力 25.5 MPa,发生在竖井底部;两井的应力未在同一高度上均匀分配,说明双井的存在对其自身受力有相当的影响。竖井最终受力状态未出现塑性区域。

表 2 开挖完成后竖井最大受力和变形

Table 2 Maximum force and deformation of shaft after excavation

项目	最大主应力/MPa	最大剪应力/MPa	最大偏应力/MPa	最大 X 方向变形/mm	最大 Y 方向变形/mm	最大总变形/mm
数值	-0.6325	25.51	24.00	2.25	2.00	7.87
位置	井口处	井底部	井底部	井口处	井口处	井口处

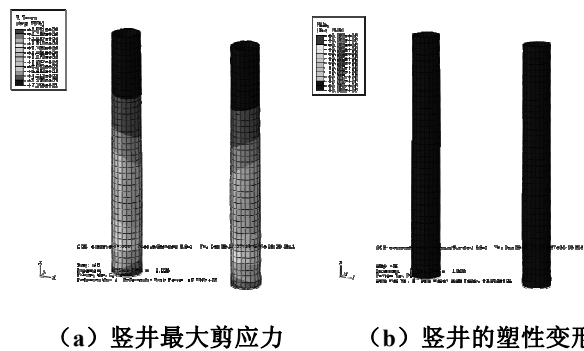


图 4 开挖完成后井壁变形与受力情况

Fig. 4 Deformation and forces of sidewall after excavation

(2) 竖井沿深度应力位移规律

由图 5,6 可以看出竖井与土之间的最大接触应力不像库仑理论阐述那样单调递增,而是先增大再递减,最大接触应力发生在 80~90 m 深度处。本文有限元数值模拟的结果与徐伟等^[1]所进行的深层竖井的离心机实验所得竖井所受应力沿深度分布规律表达基本一

致。

这是因为随着深度增大,土体上覆土层重力增大,土体的压实率增大,其土压力系数降低,对竖井的围土作用减小;同时下部土体靠近基岩层,基岩对于土体的摩擦力与土体受竖向压力和摩擦系数有关,土层深度越大,竖向压力越大,同时也越靠近岩层,摩擦系数提高,因此发生变形能力降低,以上原因造成了土层对竖井的压力呈现先递增后减小的形态。由图知竖井的最大位移发生在井口位置,为 7.87 mm,在底部约束和周围土体作用的情况下,整个竖井的变形呈现出明显的悬臂梁受剪变形形态。

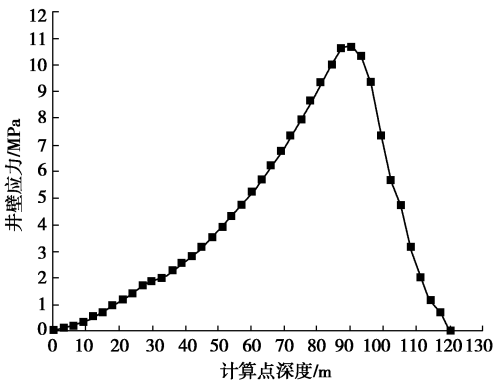


图 5 开挖完成后井壁径向接触应力

Fig. 5 Contact stress of sidewall after excavation

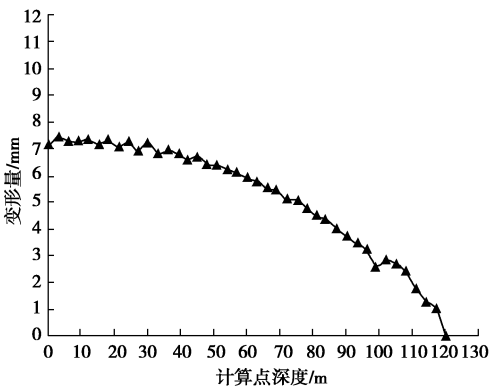


图 6 开挖完成后井壁变形

Fig. 6 Deformation of sidewall after excavation

4.2 土体计算结果分析

土体受力变形情况见表 3 所示。

表 3 不同工况下土体变形

Table 3 Deformation of soils under different conditions

项目	数值/mm	位置
最大水平变形	开挖 30 m	1.424
	开挖 60 m	1.871
	开挖 120 m	2.093
最大竖向变形	开挖 30 m	3.228
	开挖 60 m	6.207
	开挖 120 m	7.422
最大总变形	开挖 30 m	3.495
	开挖 60 m	6.472
	开挖 120 m	7.699

可以看出随着开挖深度的增加, 土体变形增大, 最大变形量 7.7 mm, 竖向变形为主要变形方向, 最大为 7.4 mm, 发生在开挖完成步, 位置在竖井上部侧土。随着开挖超过 60 m 后, 位移的增大开始缓慢。在整个开挖过程中, 土体无塑性变形出现。在模型边界的变形量基本为 0, 说明土体模型的边界取得足够大, 不会影响井 - 土相互作用分析。

随着开挖深度增加, 土体沿井侧变形增大, 但在深度超过 90 m 后, 竖井的井口处土体变形不再明显; 在竖井开挖完成后, 路径上各点变形达到最大, 没有出现明显的土层变化影响拐点。

5 结 论

通过使用 ABAQUS 有限元分析软件对整个井 - 土模型的开挖过程进行三维数值模拟分析, 得出在朗肯主动土压力假设情况下的井壁应力和应变规律和土体位移规律:

(1) 竖井的受力形态呈现出悬臂梁的受剪状态, 最大剪应力发生在底部, 最大位移发生在竖井上部, 且双井的存在对其自身受力有相当的影响; 井 - 土接触应力先增大再减小, 最大接触应力发生在 3/4 深度处。

(2) 随着开挖深度增加, 土体沿井侧变形增大, 在深度超过 90 m 后, 竖井的井口处土体变形不再明显。随着开挖深度的增加, 土体表面的隆起量增大, 并且增幅渐小。井口土体变形的影响范围在 8 米内。而两井之间的土体表面变形量大于井外侧土体表面变形, 叠加增幅达 14%。

此外, 从施工角度来说, 在该竖井工程的覆盖段

井壁施工中, 采用开挖一层、支护一层的施工方案, 土层锚杆和混凝土衬砌紧随土方开挖而进行。开挖至竖井底部后, 方进行整体混凝土永久井壁的浇筑。工程界采用这种施工顺序主要是考虑井壁的整体性要求, 按照本次数值分析的结果, 其是符合工程安全储备要求的。

参考文献:

- [1] 徐 伟, 申青峰. 深厚覆盖层中竖井井壁土压力研究[J]. 建筑施工, 2010, 32(3): 221 - 224. (XU Wei, SHEN Qing-feng. Study on earth pressure of vertical shaft wall in deep and thick covering layer[J]. Building construction, 2010, 32(3): 221 - 224. (in Chinese))
- [2] 王承新, 李明雨, 袁 斌. 深覆土层圆形竖井结构有限元分析[J]. 建筑施工, 2008, 30(8): 667 - 668: (WANG Cheng-xin, LI Ming-yu, YUAN Bin. Finite element analysis of circular shaft structure at stratum of deep covered soil[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 30(8): 667 - 668. (in Chinese))
- [3] 宗金辉. 深基坑开挖有限元模拟及现场实测研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. (ZONG Jin-hui. Numerical modelling of deep excavation and research on field observations[D]. Tianjin: Tianjin Univercity, 2006. (in Chinese))
- [4] 申青峰. 深厚覆盖层中竖井井壁受力分析[D]. 上海: 同济大学, 2011. (SHEN Qing-feng. Stress analysis of vertical shaft in deep and thick cover layer[D]. Shanghai: Tongji University, 2011. (in Chinese))

(本文责编 李运辉)