

Study on the Mechanical Behavior of Shaft Sinking Derrick under the Condition of Uneven Settlement of Foundation

Fanghao Sun^{1,2}, Zhiqiang Liu^{1,2}, Bo Wang^{1,2}, Yuchi Zhang^{1,2}, Zhen Niu^{1,2}

¹School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

²Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu

Email: 1374311721@qq.com

Received: Jun. 11th, 2020; accepted: Jun. 26th, 2020; published: Jul. 3rd, 2020

Abstract

The freezing method will lead to the frost heave, thaw and subsidence of the soil and uneven settlement of the derrick foundation, which will lead to the change of the stress on the main members of the derrick and the deviation of the derrick center, which will seriously affect the normal operation of the derrick. In order to study the influence of uneven settlement of derrick foundation on the stress characteristics and central displacement of key members of derrick, a finite element model was established and the load was applied to a large vertical derrick as an example. The test results show that the single foundation settlement of the derrick will not only increase the bending moment of the derrick crane beam by a high agreed value, but also cause the stress level of the main supporting members to be higher than the rated value: the settlement of the double foundation will lead to the center deviation of the derrick, which will also affect the normal work of the derrick.

Keywords

Derrick, Foundation Settlement, Stress Ratio, Axial Force, The Center Offset

基础不均匀沉降条件下立井凿井井架受力性能影响研究

孙方浩^{1,2}, 刘志强^{1,2}, 王 博^{1,2}, 张宇驰^{1,2}, 牛 圳^{1,2}

¹中国矿业大学, 力学与土木工程学院, 江苏 徐州

²中国矿业大学, 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州
Email: 1374311721@qq.com

收稿日期: 2020年6月11日; 录用日期: 2020年6月26日; 发布日期: 2020年7月3日

摘要

冻结法凿井会导致土体冻胀融沉, 使立井井架基础发生不均匀沉降, 从而导致井架主要杆件受力发生变化以及井架中心的偏移, 严重影响立井井架的正常工作。为研究井架基础不均匀沉降对井架关键杆件受力特性以及中心位移的影响, 以某大型立井井架为例, 建立有限元模型并施加荷载。试验结果表明, 井架单基础沉降不但会导致井架天轮平台梁的弯矩增加高约定值, 还会使主要支撑杆件应力水平高于额定值: 双基础沉降会导致井架中心偏移, 同样影响井架的正常工作。

关键词

凿井井架, 基础沉降, 应力比, 轴力, 中心偏移

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来, 随着我国冻土区工程建设以及人工冻结法在深立井工程中的应用, 土体的冻胀或融沉会导致井架基础的不均匀沉降, 相应的井架基础沉降规律以及防护逐渐引起了研究者的重视[1]。采用的立井凿井井架属于钢结构, 是井筒施工期间进行凿井提升和悬吊施工设备而设立的特殊钢结构体[2]。肖启芳、李明等通过对井架基础加固有效阻止了在立井在冻结壁解冻, 井架基础出现了不均匀沉降后井架的进一步沉降偏移[3]; 韩应伟、江成凯、王智慧对井架基础沉降原因做出系统的分析, 并且利用地基静压注浆加固法有效控制住了井架的沉降偏移[4]。王堂[5]等利用 FLAC^{3D} 对位于矸石回填土、注浆加固地基和整体联合加固 3 种方案下井架基础产生的不均匀沉降进行了模拟和分析, 根据模拟数据对各方案的有效性做出对比。吴学超、靳合波、袁兴明[6]利用 SPSS 软件以及 BP 神经网络模型对井架沉降进行预测分析, 成功地预测出了的沉降数据; 王娟娟[7]运用 ANSYS 建立有限元模型证明了输电塔塔基发生沉降时对杆塔的影响大于塔基沿顺线路和垂直于线路方向移动时对杆塔的影响; 姜太荣[8]等基于数值模拟分析方法, 研究支座不同位移工况下输电塔或塔线体系的杆件应力、塔体变形、电缆线及相互影响。路中科[9]通过分析不均匀沉降产生的原因, 研究不均匀沉降对不同井架的内力及变形影响, 对《矿山井架设计规范》提出修改意见; 陈宏[10]通过模型试验及理论分析, 获得了钢结构井架在荷载及基础沉降作用下的应变和应力; 王韶辉[11]通过新立金矿实际工程背景, 提出冻结壁融沉造成的一系列问题是不均匀沉降的主要原因; 笔者利用 SAP2000 建立井架模型, 选取正常工况对井架基础不同程度的沉降做出仿真, 对井架主要杆件的受力状态和应力水平随基础沉降量增大的变化规律做出总结, 并且归纳井架天轮平台水平方向的位移变化, 防止出现吊盘与井筒接触的问题, 通过两个角度更精准地评定井架的失效标准。

2. 大型立井凿井井架特征

随着现代科技的不断进步与发展, 矿山建井技术和施工机械化水平有了很大提高, 煤矿井筒深度不断增加, 井筒断面不断加大, 现有类型凿井井架已经远远不能满足井筒直径在 10 m 以上或井深在 1000 m 以上的立井凿井施工需求[10]。

为满足超深超大立井井筒的施工, 我国目前已研制了大型立井凿井井架, 可适应凿井井筒直径 12 m、井筒深度 1200 m 的工程条件。该凿井井架基础至天轮平台高 28 m, 井架腿跨距 17×17 m, 质量 185 t, 天轮平台平面尺寸 9.5×9.5 m, 主腿钢管 $\Phi 377 \times 16$ 、承载能力达到 6000 kN。

3. 井架基础有限元模型沉降

3.1. 有限元模型建立

凿井井架天轮平台、井架主体、支座以及杆件和杆件之间通过不同的节点连接, 井架结构中主要的连接方式主要有两种铰接节点连接和刚节点连接, 一般的钢结构的连接方式多为焊接或螺栓连接, 只有当杆件承受的力主要是轴力时, 可以把这种杆件的连接看作是铰接节点, 刚节点连接的两构件不可以相对转动, 建立大型立井凿井井架的计算模型如图 1 所示。考虑到篇幅过长, 笔者优先选取不同基础沉降情况时的主要支撑杆件所受轴力情况和应力水平的变化以及天轮平台梁的弯矩变化为主要研究指标来讨论井架各杆件是否失效, 通过统计井架天轮平台中心水平方向的位移变化, 对比《矿山井架设计规范》(GB 50385-2006)标准, 探讨井架吊盘与井壁的接触问题。

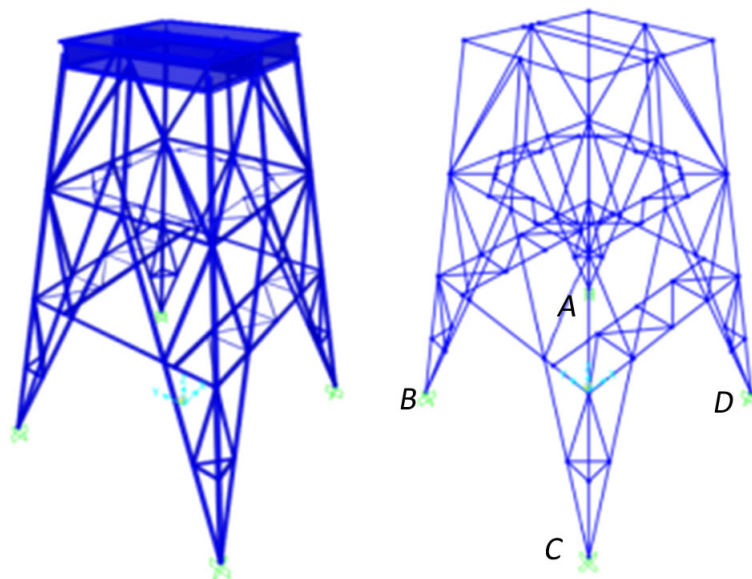


Figure 1. Finite element model of derrick
图 1. 井架有限元模型

3.2. 单基础沉降

由图 1 可知, 井架的主体和井架的支座是对称的结构, 与 CD 水平方向垂直平面为井架的主提升面, 结合《矿山井架设计规范》对地基变形的规定, 并考虑各种情况下大型凿井井架各支座分别沉降 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、90 mm 时井架天轮平台主要杆件应力比及变形规律。由于井架是中心对称结构, 对于单基础沉降, 笔者分别模拟了 B、C、D 三个支座发生沉降的情况, 通过得到的数据结果大致相同,

本文以 B 基础沉降的数据为主来进行讨论与分析, 表 1 为 B 支座的沉降值。

Table 1. Single foundation settlement value table

表 1. 单基础沉降数值表

组别	沉降值(mm)			
	A	B	C	D
1	0	20	0	0
2	0	40	0	0
3	0	60	0	0
4	0	80	0	0
5	0	90	0	0

3.3. 双基础沉降

双基础沉降是指井架相邻两个基础同时发生沉降, 而两个基础同时沉降相当于另外两基础同时隆起, 不同于单基础沉降, 井架工作时分主提升面和副提升面。本文双基础沉降模拟方案如表 2 所示。

Table 2. Change of longitudinal displacement of double foundation

表 2. 双基础纵向位移变化数值表

对称轴	组别	沉降值(mm)			
		A	B	C	D
AD	1	20	0	0	20
	2	40	0	0	40
	3	60	0	0	60
	4	80	0	0	80
	5	90	0	0	90
CD	1	0	0	20	20
	2	0	0	40	40
	3	0	0	60	60
	4	0	0	80	80
	5	0	0	90	90

4. 计算结果与分析

4.1. 主要杆件受力分析

天轮平台杆件编号如图 2 所示。

B 支座沉降: 从图 3 可得到, 随着支座 B 沉降量的发生, 井架天轮平台各杆件的弯矩在发生着变化, 由图 3-a 可以看出井架正常工作时, 主要提升杆件 24 号、25 号梁所受弯矩均在水平方向, 但是随着沉降量的不断变大, 这两根杆件会受到纵向的弯矩, 且越来越大, 其它杆件 1、3、4、6 号杆件所受弯矩也逐渐增加。从图 3 中的信息可以得出, 随着 B 支座沉降量的增加, 天轮平台各杆件的受力变化都是比较明显的。下面就天轮平台各杆件进行具体分析:

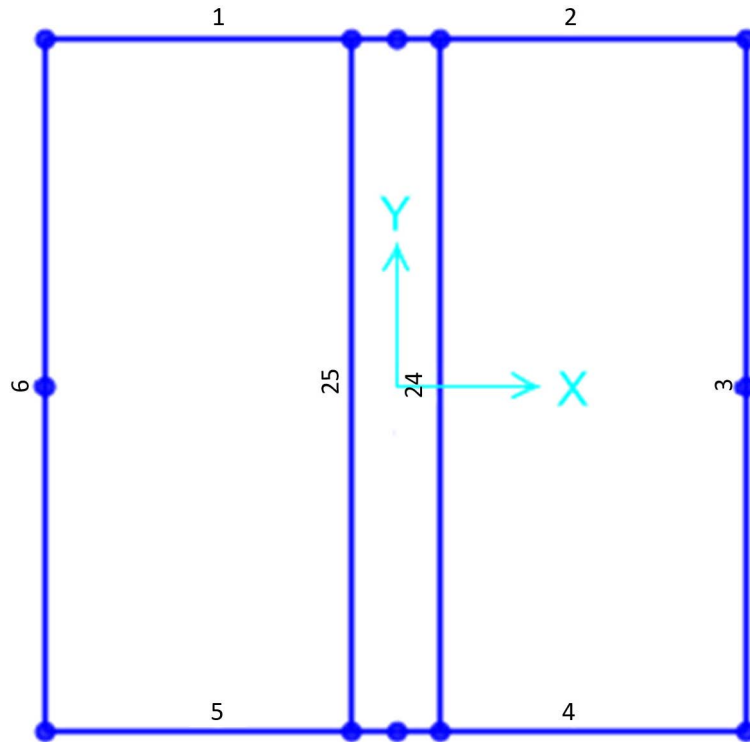


Figure 2. Bar number of high platform
图 2. 天轮平台杆件编号

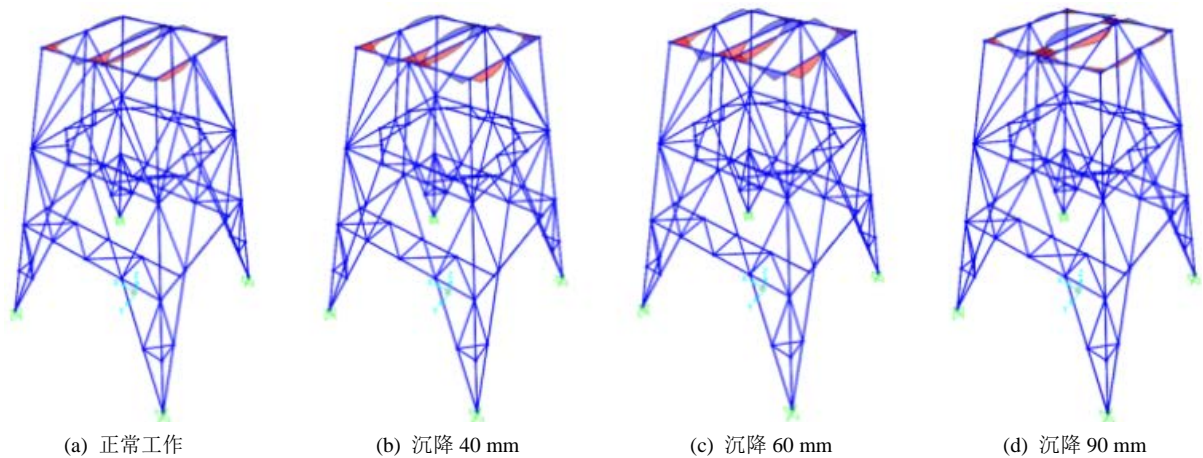


Figure 3. Cloud diagram of bending moment of settlement high platform beam on B support
图 3. B 支座沉降天轮平台梁弯矩云图

由图 4 可知，随着 B 支座沉降的增大，与支座 B 不直接相连的天轮平台杆件 2 和与杆件 2 中心对称的杆件 5 的弯矩保持不变，而与 B 支座相连的杆件 1、杆件 3 和与他们成中心对称的杆件 4、杆件 6 以及主要提升梁 24、25 弯矩的绝对值会随着 B 支座的沉降量的增加而逐渐增大。当 B 支座的沉降量达到 80 mm 到 90 mm 时，天轮平台各杆件所受弯矩已达到 1000 KN-m，由此可见，单基础沉降对井架天轮平台各杆件的影响很大，会导致井架天轮平台无法正常运转。

除天轮平台各杆件以外，图 5 所示为大型凿井井架主要支撑杆件，这些杆件的受力情况以及应力比大小对井架的正常运转与天轮平台梁同样起到关键性的作用，本文对其进行以下系统分析：

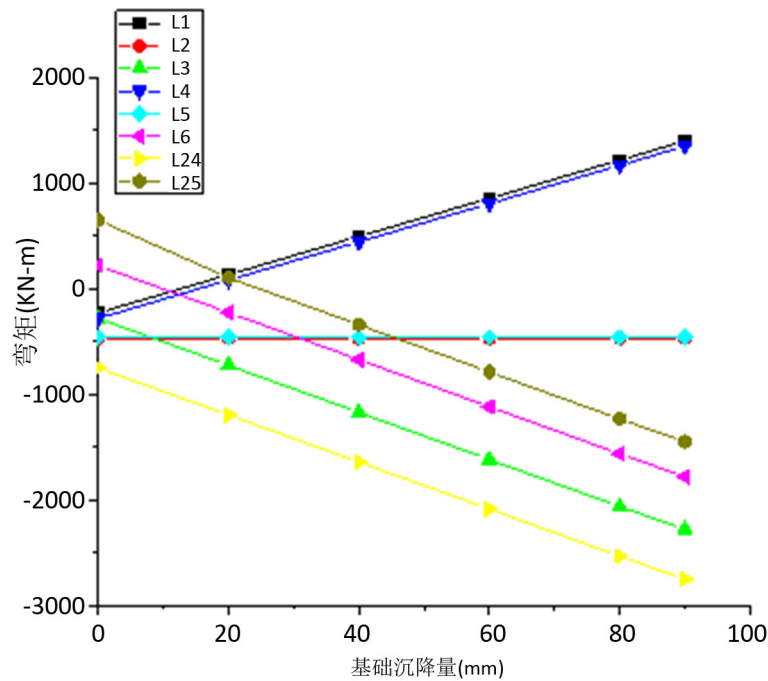


Figure 4. B bending moment curve of the pedestal settlement high platform beam
图 4. B 支座沉降天轮平台梁弯矩曲线

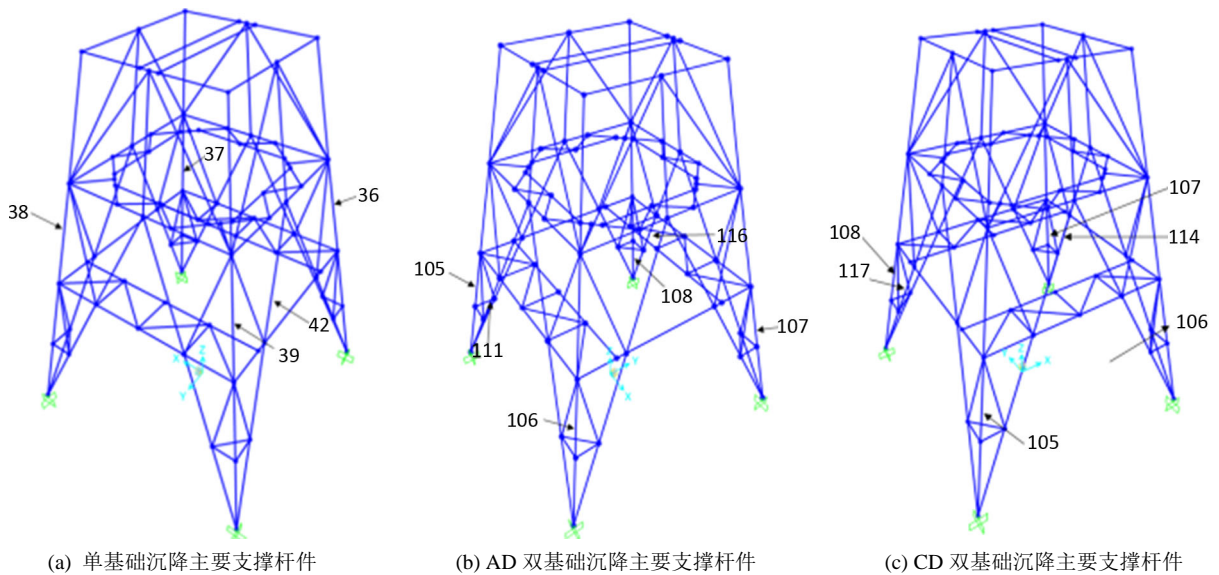


Figure 5. Main supporting members
图 5. 主要支撑杆件

由图 6 可以看出,与基础 B 直接相连的支撑杆件 G39 以及与其成中心对称的 G37 所受轴力绝对值均逐渐减小,变化规律和主提升面上的 G42 基本一致,而 G42 的受力状态由受压变成受拉,而与 B 相邻的支座 A 和支座 C 相连的主要支撑杆件所受压力随 B 基础的沉降逐渐增大,由此可见在井架单基础沉降时,与沉降基础相连的主要支撑杆件的受力状态和正常工况时相比所受压力会逐渐减小,直至变成受拉状态,而与沉降基础相邻的支座相连的主要支撑杆件所受压力会逐渐增大,从而分担与沉降基础相连的主要支撑杆件所受的压力。主要支撑杆件的应力比,如图所示各杆件的应力比变化与其所受轴力变化完全一致。

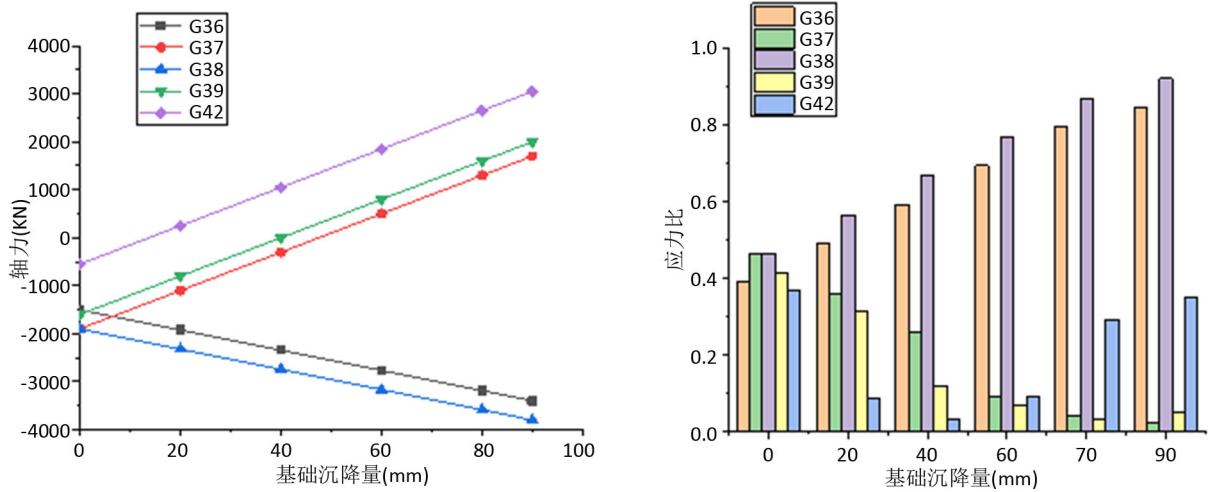


Figure 6. The axial force and stress ratio of main supporting members change with the settlement of single foundation
 图 6. 主要支撑杆件轴力及应力比随单基础沉降变化规律

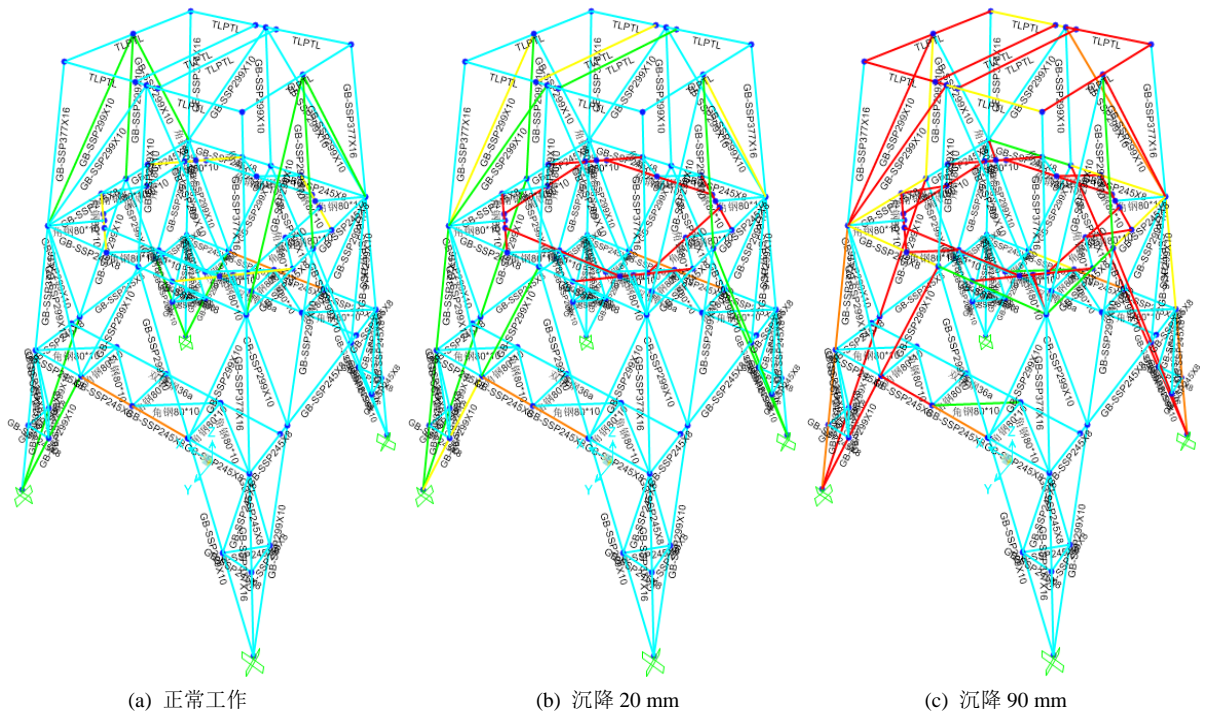


Figure 7. Stress ratio variation of each member in single foundation settlement
 图 7. 单基础沉降各杆件应力比变化简图

图 7 为单基础沉降时井架各杆件应力比变化的示意图，图中颜色越深代表杆件应力比越大，杆件受到破损越严重。由图可知单基础沉降时主要受影响的杆件是不同的，沉降时与沉降基础相邻两基础相连的支撑杆件破坏程度比较严重。

对于双基础沉降，首先观察天轮平台梁的弯矩随基础沉降的变化规律，计算结果如表 3 所示。

而表 3 为双基础沉降前后天轮平台梁的弯矩值，可以看出当双基础沉降值达到 90 mm 时，天轮平台梁所受弯矩并无明显变化。由此可见，与单基础沉降不同，井架双基础沉降对其天轮平台各杆件受力没有影响。

Table 3. Bending moment of high platform with double foundation settlement
表 3. 双基础沉降天轮平台弯矩

对称轴	杆件编号	弯矩(KN/m)		
		正常工作	沉降 90mm	
AD	1	55.031	54.881	
	2	-667.72	-667.869	
	3	-1,463.681	-1,461.088	
	4	22.88	23.029	
	5	-459.139	-458.99	
	6	-1,502.001	-1,504.594	
	24	-593.369	-593.369	
	25	-409.511	-409.511	
	CD	1	55.031	52.406
		2	-667.72	-665.094
3		-1,463.681	-1,463.826	
4		22.88	25.505	
5		-459.139	-461.765	
6		-1,502.001	-1,502.145	
24		-593.369	-593.368	
25		-409.511	-409.511	

通过对双基础沉降井架所有杆件所受轴力以及应力比变化的统计，本文选择图 5 所示主要支撑杆件作为研究对象分析双基础沉降对井架工作状态的影响，具体分析如下：

由图 8 和图 9 可知，无论井架以对称轴 1 或对称轴 2 发生双基础沉降，其主要支撑杆件的应力比较大，但轴力变化不太明显，只有图 9 中，当井架主提升面上的两个基础同时发生沉降时，与主提升面相垂直面上的主要支撑杆件所受轴力逐渐变大，但变化幅度并不明显。

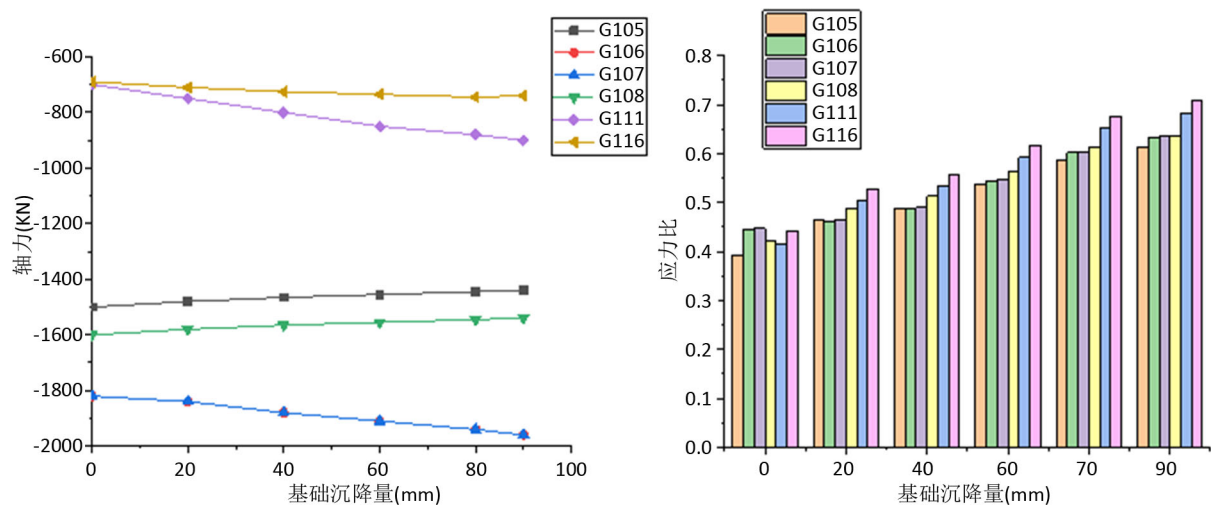


Figure 8. Changes in axial force and stress ratio of main supporting members of AD double foundation settlement
图 8. AD 双基础沉降主要支撑杆件轴力及应力比变化

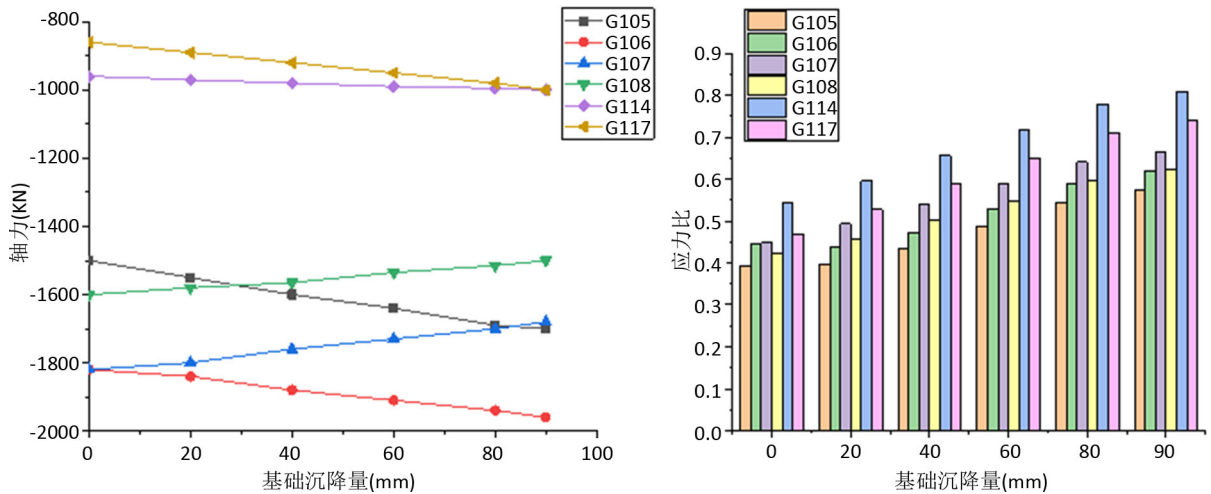


Figure 9. Variation of axial force and stress ratio of main supporting members in the settlement of CD double foundation
图 9. CD 双基础沉降主要支撑杆件轴力及应力比变化

4.2. 天轮平台位移分析

除了井架内部主要杆件失效的情况，井架天轮平台会发生位移，从而带动吊盘也跟着移动，这样就很容易导致吊盘和井筒接触导致井筒施工无法正常工作。《矿山井巷工程施工及验收规范》规定，吊盘上的突出部位与混凝土井壁或模具之间的距离不得大于 100 mm。所以根据《矿山井巷工程施工及验收规范》吊盘水平方向的移动距离不得超过 100 mm，如果大于 100 mm 吊盘就会和井壁接触。所以在讨论井架能否正常工作时，我们不仅要考虑其内部主要杆件的受力情况，还要考虑到井架天轮平台位移的变化情况。

因此笔者在对数值模型进行计算之后对井架模型天轮平台中心在 X、Y 方向上的位移变化进行了提取，具体变化如图 10。

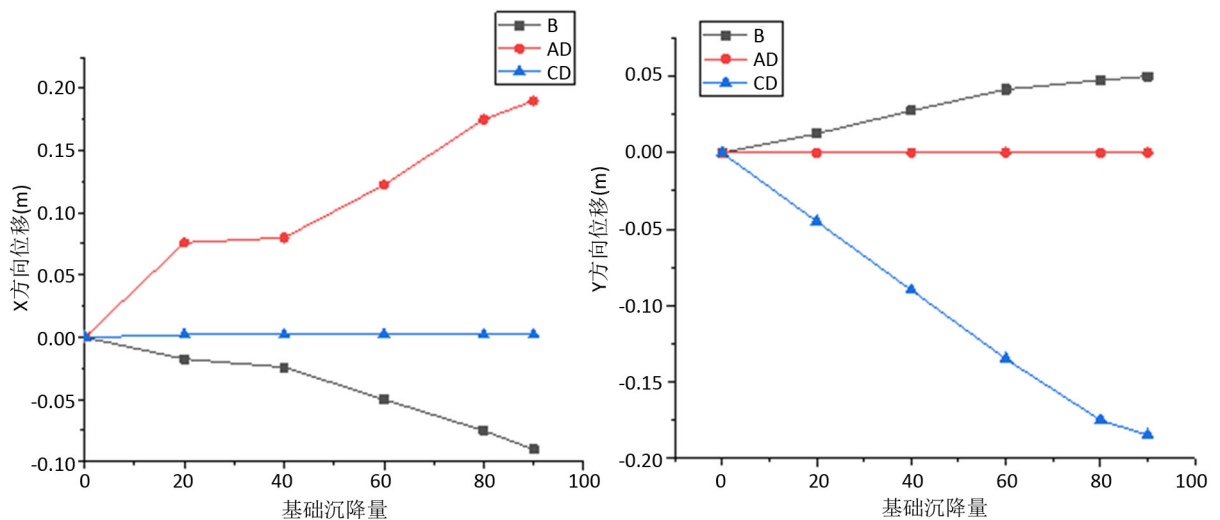


Figure 10. Variation rule of derrick center with foundation settlement
图 10. 井架中心随基础沉降变化规律

通过图 10 可知单基础沉降时，井架天轮平台中心水平方向上的位移不超过规定范围，且沉降时平台

中心的位移走势基本一致, 不会发生吊盘与井筒的碰撞, 而双基础沉降时天轮平台位移过大, 在沉降 45 mm 之后, 其水平方向上的位移已经超过 100 mm, 导致井架无法正常工作。

5. 结论

1) 单基础沉降时, 随着基础沉降或隆起量的增大井架天轮平台梁所受弯矩逐渐增大, 会导致天轮平台无法正常工作;

2) 单基础沉降时, 与沉降基础以及其成对角关系基础相连的主要支撑杆件所受轴力随着沉降量的增加, 由受压状态逐渐转为受拉力状态, 而与之相邻的两个基础所连接的主要支撑杆件所受压力逐渐增大。单基础沉降时, 四个基础相连的主要支撑杆件的受力状态与单基础沉降时恰好相反, 与沉降基础以及其成对角关系基础相连的主要支撑杆件所受轴力随着沉降量的增加, 受到压力逐渐增大, 而与之相邻的两个基础所连接的主要支撑杆件由受压状态逐渐变为受拉状态;

3) 单基础沉降导致井架工作中大量重要杆件应力水平超过额定值, 对井架的正常运行有非常危险的影响, 与单基础位移变化相比, 双基础沉降无论是主提升面侧两基础或是副提升面侧两基础沉降对天轮平台梁以及各主要支撑杆件的强度影响不是很严重;

4) 双基础沉降不会导致杆件失效而引起井架无法正常工作, 但与单基础沉降相比, 双基础沉降超过 45 mm 时会导致井架天轮平台水平向位移超过 100 mm, 吊盘与井壁出现碰撞, 造成井筒无法正常施工, 因此, 建议凿井井架设计相关规范进一步明确基础的沉降允许量, 以便指导凿井井架的工程应用。

基金项目

大型凿井井架及井壁吊挂关键技术与装备(863 计划)课题(2012AA06A402); 深部冻融土 - 混凝土结构相互作用接触界面力学特性研究(51874286), 国家自然科学基金面上项目。

参考文献

- [1] 李思齐, 杨平, 张婷, 鲍俊安. 粉质黏土水泥土冻胀融沉特性研究[J/OL]. 冰川冻土, 1-8 [2020-01-09].
- [2] 刘志强, 王博, 杜健民, 李明楼. 新型单平台凿井井架在深大立井井筒施工中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(10): 24-29.
- [3] 肖启芳, 李明, 陈保淦, 王力, 黄富昌. 冻结立井井架基础不均匀沉降处理[J]. 建井技术, 2009, 30(4): 37-39.
- [4] 韩应伟, 江成凯, 王智慧. 煤矿主井地基静压注浆治理井架沉降偏移技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(6): 105-110.
- [5] 王堂, 苏学贵, 张赞, 杨宗一, 张锁. 特大型立井凿井井架基础稳定性控制研究[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(9): 101-104.
- [6] 吴学超, 靳合波, 袁兴明. SPSS 软件在矿井井架沉降分析中的应用[J]. 矿山测量, 2014(2): 90-92+7.
- [7] 王娟娟. 地基变形影响下输电塔的动态特性分析[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 61-64.
- [8] 姜太荣, 张翼虎, 王永泉, 于彬, 张元良, 葛亚平. 不均匀沉降条件下输电塔线体系安全性能研究[J]. 施工技术, 2018, 47(4): 132-136.
- [9] 路中科, 马中成. 不均匀地基沉降对钢井架的影响[J]. 煤炭工程, 2016, 48(8): 28-30.
- [10] 陈宏, 史天生. 多绳提升钢井架受人工冻土影响的试验[J]. 中国矿业大学学报, 1999(6): 57-60.
- [11] 王韶辉, 尤春安, 麻壮志, 邱龔, 吕言新. 新立副井井塔不均匀沉降分析[J]. 工程勘察, 2012, 40(2): 33-37.