

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.01.012

潘峰, 党发宁, 陆亮, 等. 大型调压井沉井受力特性探讨及施工方法改进[J]. 水利水电工程学报, 2016(1): 78-86. (PAN Feng, DANG Fa-ning, LU Liang, et al. Mechanical characteristics of large caisson for surge shaft and its improvement of construction methods[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(1): 78-86.)

大型调压井沉井受力特性探讨及施工方法改进

潘 峰¹, 党发宁¹, 陆 亮², 段 彬³, 杨小妹³

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 甘肃省建筑设计研究院, 甘肃 兰州 730030; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对某工程砂卵石覆盖层中大型调压井沉井规模大、所处地层均匀性差、大体积孤石数量多、受地层性质及施工因素影响大等特点,以及施工面临的井身偏移倾斜、刃脚被孤石破坏及井壁与地层脱空等问题,首先进行了成因分析,解析比较了施工过程中沉井井壁土压力的变化;最后通过数值方法对沉井下沉过程中地层含有孤石时的施工方法进行了对比分析。结果表明:当土压力由先前的静止土压力转变为被动土压力时,井壁偏于不安全;沉井下沉过程中地层含有孤石时,应将前期先开挖土体再破除孤石的下沉开挖方法调整为先破除孤石再开挖土体,调整后大幅降低沉井井壁和刃脚的应力,避免了井壁和刃脚出现破坏。

关 键 词: 沉井; 偏移倾斜; 孤石; 井壁脱空

中图分类号: TV732⁺.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)01-0078-09

沉井作为一种深基础形式,广泛应用于桥梁、港口及水利水电工程建设中^[1-4]。在一些水利水电工程中,调压井的布置往往受场地狭窄以及地形条件限制而不适宜大开挖施工,采用沉井施工方案不失为一种合理选择。随着沉井规模尺寸逐渐加大,加之地质条件复杂,施工中频发如拒沉、超沉、突沉等质量事故,严重影响了施工安全和工程进度。

对于大型沉井工程,现有研究多为关于沉井受力机理^[5-8]、下沉阻力^[9-12]和施工技术^[13-15]等方面的探讨,其中 S. Saran 等^[5]对沉井刃脚基础反力进行了研究,并用试验方法确定了环形刃脚作用下的地基极限承载力。王红霞等^[6]对大型沉井结构施工力学模型进行了研究,通过解析方法建立了能够反映一定开挖量和下沉量关系的沉井施工过程动态力学模型。W. D. Hong 等^[9]对大尺寸气压式沉箱下沉过程中的单位摩阻力进行了计算,结果与实测值符合较好。陈晓平等^[10]现场监测了沉井下沉全过程,对下沉机理和下沉阻力分布特征进行了理论分析,给出了最大侧壁摩阻力的计算公式和分布特征。陶建山^[13]采用深井降水和泵吸挖土的排水下沉方案,达到安全快速施工大型沉井基础的目的。这些研究成果有助于指导沉井的实际施工,但对于特殊地质条件下,如在含大块卵石砾石覆盖层中施工的沉井工程则有一定局限性。现阶段关于此类砂卵石覆盖层中沉井施工的研究成果并不多,可借鉴的工程经验较少,尤其在一些开挖尺寸大、下沉深度深的大型调压井沉井工程中,能否保证井身及刃脚结构的安全显得尤为重要。就目前的研究方法而言,对于地质条件复杂的大型沉井,整个动态施工过程中存在许多不确定性因素,很难通过解析方法建立合适的力学模型,而模型试验也难以准确反映现场地质条件及施工过程,试验结果偏差较大,且试验费用昂贵。数值试验则具有可重复性,试验成本低等优点,根据相关研究^[16-18],数值模拟方法可较好模拟土与结构相互作用,能够分析沉井内部的受力状态,计算结果的可靠性在工程应用中已得到有效验证。因此,采用数值模拟方法

收稿日期: 2015-06-23

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目专题(201501034-04);陕西省科技统筹创新工程重点实验室项目(2014SZS15-Z01);西安理工大学博士基金资助项目(106-211104)

作者简介: 潘 峰(1984—),男,陕西西安人,博士研究生,主要从事岩土计算力学研究。E-mail: Joy840629@163.com

研究特殊地质条件下大型调压井沉井施工过程是可行的。

某水电站调压井沉井处于砂卵砾石覆盖层中,其下沉施工中出现如下严重影响施工安全的问题:沉井井身整体出现偏移倾斜,施工中的轴线与设计轴线不重合,井壁多处开裂;沉井下沉中刃脚踏面处孤石较多,处理难度大,刃脚局部钢板发生鼓胀变形,内部混凝土被拉坏;沉井四周井壁与砂砾石层部分脱空,受阻面积减小,井壁受力不均。本文通过理论分析研究了所遇到的问题及成因,采用解析法研究了沉井由于倾斜而存在的风险,用有限元模拟了沉井下沉过程中遇到孤石时刃脚及井壁的受力情况,最后提出后续施工应采取的技术措施,终于使得该沉井顺利就位。

1 工程概况和地质条件

该水电站位于甘肃省舟曲县的白龙江干流,是一座引水式电站,枢纽主要建筑物包括:首部混凝土闸坝、发电引水隧洞、调压井及压力钢管、电站厂房及开关站等。水电站调压井布置在厂房背后山坡上,上接引水隧洞,下接压力管道,调压井为阻抗式,顶部为敞开式,顶部高程 1 590.2 m,底部高程 1 516.00 m,高程 1 524.0 m 以上采用沉井方法开挖。调压井井筒下部直径 18.0 m,高 9.5 m,上部沉井直径 22.0 m,高 65.0 m,总高度 74.5 m,其中沉井共分 10 节,底节高度 3.5 m,2 至 4 节为 9 m,第 5 节为 5.5 m,第 6 至 9 节为 6 m,第 10 节为 5 m,依次接高下沉,沉井结构及地质剖面详见图 1。

如图 1 所示,调压井 1 524.0 m 高程以下为基岩,以上为覆盖层,覆盖层厚约 98.2 m,上半部为淡黄色粉土和块碎石土,厚 33.4 m;下半部为冲洪积含漂石砂卵砾石层,厚 64.8 m,漂石约占 5%~8%,粒径一般 0.4~0.6 m,最大可达 1.5 m,在 1 565~1 575 m 的高程段含有一孤石层,孤石含量较高体积较大,最大直径可达 4~5 m,密实。下部岩石岩性为绢英千枚岩夹花岗闪长岩沿脉组成。

水电站调压井沉井布置有以下特点:沉井规模大,沉井外直径达 25.2 m,高度达 65.0 m,受地层性质及施工因素影响大,容易发生偏移倾斜;地质条件差,上部为深厚覆盖层,覆盖层里的孤石数量多、体积大,沉井下沉过程中遇到大体积孤石后,存在刃脚变形、井壁开裂和难沉等一系列风险。下部岩石为绢英千枚岩,围岩破碎,完整性较差,施工中井壁易产生坍塌破坏。加之没有类似工程经验可借鉴,如何确保该调压井沉井在复杂地质条件下安全顺利的下沉至设计深度,是本工程的一大技术特点与难点。

2 调压井沉井施工中遇到的问题及成因分析

沉井下沉初期较为顺利,当沉井第 2 节制作完成并下沉至孤石层时,井身出现了 0.17 m 的中心偏移以及 $0^{\circ}32'42''$ 的倾斜,倾斜侧井壁多处开裂。这是由于基土均匀性较差,其中孤石量占沉井开挖量的 70%~80%,刃脚踏面下方多处出现大体积孤石,沉井下沉过程被孤石所搁置,开挖时大体积孤石难以处理,影响了下沉的均匀性。另一方面,沉井上下游方向处于一个山坡的边缘,上游一侧地势高于下游一侧,即上游土压力比下游大,加剧了沉井的不均匀下沉。

由于砂卵砾石地层的承载能力较高,沉井刃脚不是切取而是局部承压,并且砂卵砾石层中孤石岩性为灰岩且质地较硬,加之施工中采取了先软后硬的开挖顺序,当刃脚踏面下方易于开挖的土体被掏空后,一些位

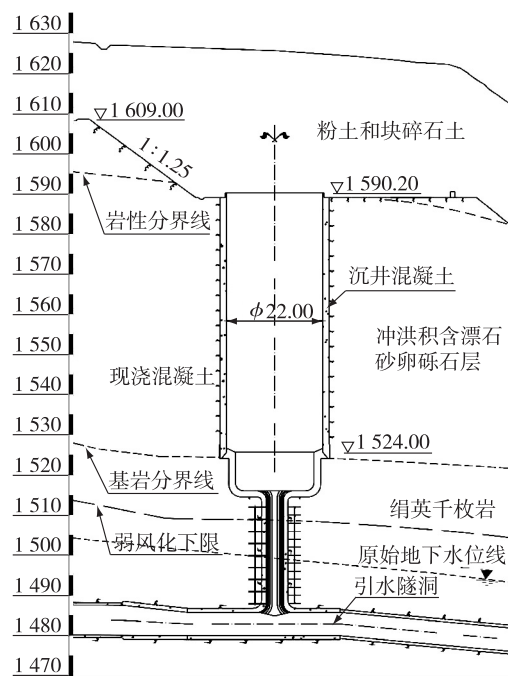


图 1 沉井结构及地质剖面(单位: m)

Fig. 1 Diagram of caisson's structural and geological section (unit: m)

置出现了孤石单独支撑刃脚的情况,部分刃脚因局部承压过大而导致钢板发生鼓胀变形,使得刃脚钢板鼓胀处内部混凝土也因受力集中被破坏,如图 2 和 3 所示。



图 2 沉井被刃脚下孤石搁置

Fig. 2 Caisson supported by boulders below cutting curb



图 3 刃脚钢板鼓胀变形

Fig. 3 Expansion deformation of steel plate of cutting curb

沉井所处地层为砂卵砾石层,该地层弹性模量较大,不易发生侧向变形,砂卵砾石层黏聚力小且分布不均匀,在井壁摩擦力作用下易脱落掉块,在开挖刃脚内土体时会顺着外壁流入井内,造成部分井壁与外侧砂砾石层脱开,如图 4。脱空最严重的地方甚至出现从底部贯通至顶部的情况,脱空面积越大受阻面积越小,井壁受力越不均匀。摩阻力较小的一侧可产生少量的超前沉降,使该侧井壁倾斜,并局部挤压地层,井壁趋于不安全,同时,地层摩阻力又直接影响刃脚承压荷载的大小,过小的摩阻力使得刃脚处应力集中作用更明显,刃脚趋于不安全。

因此,针对以上出现的问题,为确保沉井后续施工及沉井安全,应对不同情况下沉井施工过程中井壁以及刃脚的受力进行分析,并确定合理的开挖方案及后续施工措施,使其安全顺利地地下沉至设计标高处。

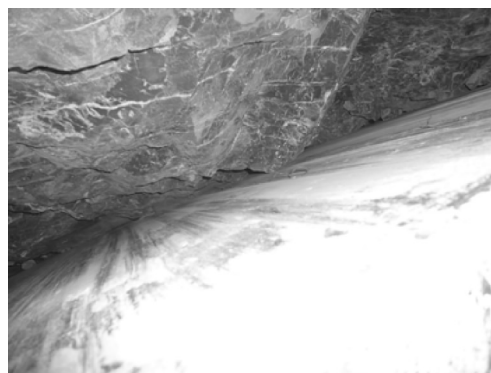


图 4 沉井井壁与地层出现脱空

Fig. 4 Well bore disengaging from formation

3 沉井倾斜时井壁强度解析法复核

由于沉井在下沉过程中出现了偏移倾斜,部分井壁出现了开裂情况,为分析沉井下沉状态由竖直变为倾斜时井壁的受力情况,本节按照弹性力学厚壁圆筒受均布压力作用下的解析公式计算沉井的内力分布,对沉井出现倾斜时的强度进行复核。

3.1 厚壁圆筒受均布压力作用下的解析解

沉井内半径 $r=11$ m,外半径 $R=12.6$ m,施工中所受内压力 $q_1=0$,所受外压力 q_2 即为土对沉井的侧向土压力。根据弹性力学厚壁圆筒受均布压力作用下的拉梅解答得其径向应力 σ_ρ 和周向应力 σ_φ [19]:

$$\sigma_\rho = -\frac{1 - \frac{r^2}{R^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} q_2 \quad \sigma_\varphi = -\frac{1 + \frac{r^2}{R^2}}{1 - \frac{r^2}{R^2}} q_2 \quad (1)$$

当 $\rho=R$ 时, σ_ρ 取最大值, σ_φ 取最小值; $\rho=r$ 时, σ_ρ 取最小值, σ_φ 取最大值。

根据相关设计规程[19],以朗肯土压力理论对沉井的侧向土压力进行计算。根据沉井施工时的下沉状

态,将沉井所受侧向土压力分别按静止土压力和被动土压力考虑,当沉井正常施工下沉,中心线保持竖直时,井壁侧向土压力接近静止土压力;当井壁出现倾斜时,井壁局部挤压地层,井壁侧向土压力接近被动土压力。对于无黏性土,距离地表 h 深度处的静止土压力 q_0 和被动土压力 q_p 分别为:

$$q_0 = h\gamma \frac{\mu}{1-\mu} \quad q_p = \gamma h \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

式中: γ 为土重度; μ 为泊松比; φ 为内摩擦角,均按表 1 中下部砂卵石层参数建议值取值。

表 1 计算材料物理力学参数建议值

Tab. 1 Recommended values of mechanical parameters of materials

材料	重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/ $^\circ$
上部土层	15.50	0.055	0.40	23.5	25.4
下部砂砾石层	22.40	0.055	0.40	0.0	27.7
绢英千枚岩Ⅳ	27.80	7.5	0.34	550.0	33.0
绢英千枚岩Ⅲ	28.00	9	0.30	800.0	41.3
C25 混凝土	25.00	28	0.167		

3.2 沉井应力解析解计算结果

按以上方法,将式(2)代入式(1),可以计算出沉井下沉至不同深度时井壁径向和周向应力最大值,结果如图 5 所示。

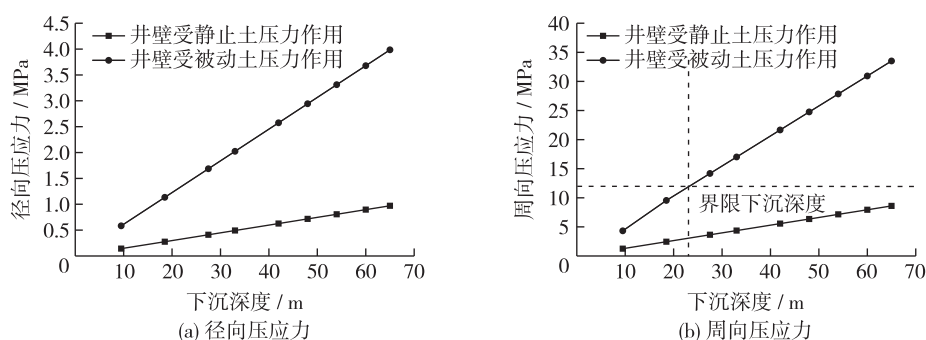


图 5 不同下沉深度井壁径向和周向压应力最大值

Fig. 5 Maximum radial and circumferential compressive stress of well bore at different depths

由图 5 可见,采用解析方法计算出的井壁径向压应力和周向压应力最大值均随下沉深度的增加而线性增大。当沉井正常施工下沉,井身中心线保持竖直时,井壁侧向土压力接近静止土压力,井壁径向最大压应力为 0.97 MPa,周向最大压应力为 8.6 MPa,整个施工过程沉井井壁压应力均在 C25 混凝土的抗压强度设计值 11.9 MPa 范围内,此时沉井结构安全。当沉井下陷施工过程中出现井身偏移倾斜时,井壁局部挤压地层,井壁侧向土压力接近以被动形式作用于沉井,井壁径向最大压应力为 3.99 MPa,井壁周向最大压应力为 33.51 MPa。当下沉深度超过 23 m 后,井壁周向最大压应力均超过 C25 混凝土的抗压强度设计值,沉井结构偏于危险,定义此深度为沉井承受被动土压力时的界限深度。以上计算结果可以反映出,在施工时要注意平衡开挖下沉,及时对沉井纠偏,防止沉井偏移量和倾斜角度过大。

4 有孤石出现时井壁及刃脚强度数值法复核

由第 2 节分析可知,大体积孤石对沉井施工极为不利,不光给沉井均匀下沉带来困难,更为严重的是,部分井壁及刃脚应力因超过混凝土强度设计值而发生破坏。因此,需要对下沉时刃脚下出现孤石的情况进行强度复核,由于解析解只能给出相对简化力学模型的解答,对于孤石存在的情况,很难进行计算,故本节采

用有限元数值计算方法对沉井下沉过程中出现孤石的情况进行分析。从地质条件可知,孤石层所处高程大概为 1 565~1 575 m,沉井下沉 24 m 便可穿过孤石层,所以计算中只考虑前 5 节沉井(共 36 m)下沉过程中孤石对井壁及刃脚的影响。

4.1 计算模型

采用 Ansys 有限元程序进行建模计算,为了消除边界效应,三维计算模型中,上下游方向和左右岸方向各取 200 m,按所提供地质资料建模。计算域上部取至地表,下部取至标高 1 430 m 处。采用笛卡儿直角坐标系,坐标原点定在 0 m 标高平面与调压井中轴线交点处。以垂直引水隧洞轴线的水平方向为 x 轴,指向左岸为正;以引水隧洞轴线方向为 y 轴,指向上游为正;以垂直方向为 z 轴,垂直向上为正。采用 solid45 实体单元对地层以及沉井调压井模型进行剖分,在地层和沉井之间添加面-面接触单元,整体模型和调压井沉井模型网格划分如图 6。

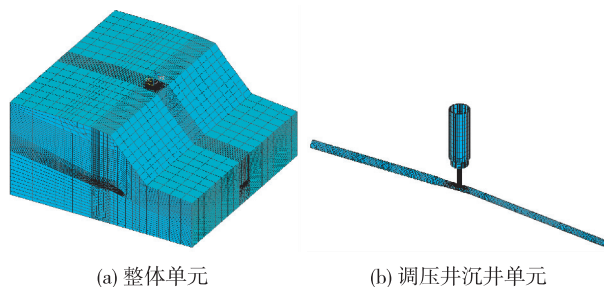


图 6 模型网格划分

Fig. 6 Model meshing

4.2 边界条件及计算参数

在沉井施工模拟前先对模型在自重荷载作用下进行初始地应力平衡,以获得调压井沉井施工前地基中的应力状态,并消除地基中的初始位移场。模型侧面施加水平法向约束,底面施加 3 个方向约束,计算中仅考虑自重荷载。利用生死单元方法来模拟覆盖层的开挖以及沉井的下沉过程。本次计算中共涉及到 6 种材料,其中覆盖层采用理想弹塑性 D-P 模型,调压井沉井采用线弹性模型,覆盖层的材料参数以及衬砌混凝土物理力学参数详见表 1。

4.3 施工过程数值模拟结果

分别考虑前 5 节沉井每节下沉到位后,刃脚由土体共同承担;每节沉井下沉到位后,先开挖土体后破除孤石;每节沉井下沉到位后,先破除孤石后开挖土体的情况。3 块孤石的位置布置在沉井下游一侧,如图 7 所示。前 5 节沉井高度分别为底节 3.5 m,第 2 至 4 节均为 9 m,第 5 节 5.5 m,总高度为 36 m。下沉至不同深度时,井壁和刃脚应力计算结果如图 8 和 9 所示。

由图 8 和 9 可见,整个施工过程中,无论何种工况,井壁和刃脚的 Z 向压应力均随深度增加而单调递增。沉井每节下沉到位后,沉井由刃脚下孤石和土体共同支撑时,井壁和刃脚垂向压应力增幅较小,下沉至第 5 节时出现最大值,分别为 3.98 和 5.00 MPa,均在 C25 混凝土抗压强度设计值范围内。从井壁的应力等值线图也可以看出,井壁受力规律性较好,说明即使沉井下沉到位后遇到孤石,但由于刃脚能够完全和土体及孤石接触,刃脚受力点分布均匀,因此在井壁及刃脚处没有出现应力集中区,此时沉井结构安全。

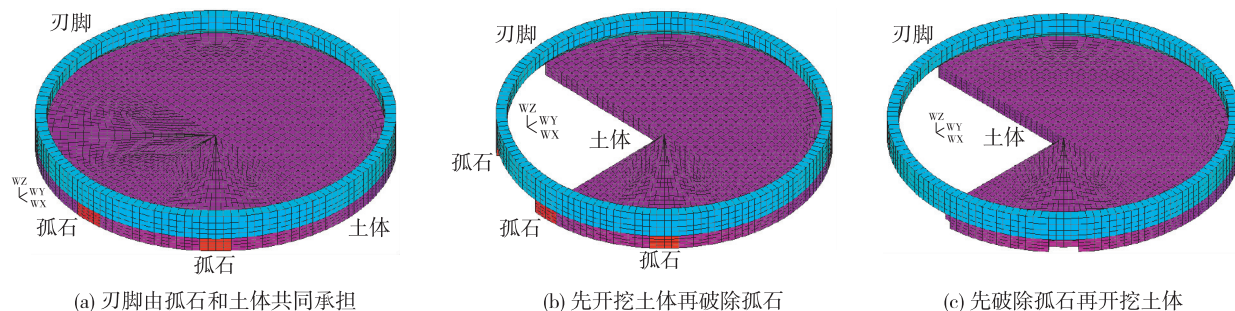


图 7 刃脚的支撑形式

Fig. 7 Supporting form of the cutting curb

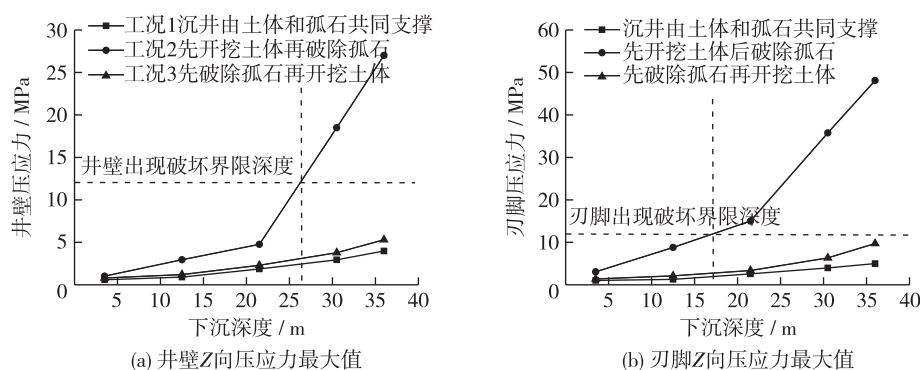


图8 Z向压应力随下沉深度变化曲线

Fig. 8 Changing curves of Z-axis compressive stress with sinking depths

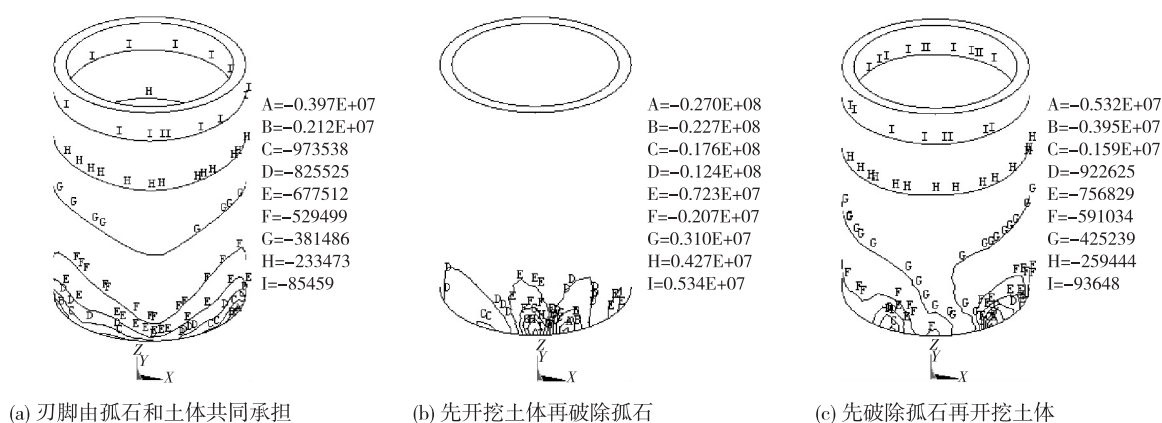


图9 第5节井壁Z方向压应力等值线(单位:Pa)

Fig. 9 Compressive stress contour of Z-axis of 5th section of well bore (unit: Pa)

但沉井若进一步下沉,需开挖井内土体,如果先开挖土体,部分刃脚便仅由孤石单点支撑,此时井壁和刃脚孤石支撑处出现应力集中,垂向压应力会大幅增大。当沉井下沉超过界限深度17.2 m时,沉井刃脚出现破坏;超过26.4 m时,沉井井壁也出现破坏,下沉过程中井壁和刃脚处最大压应力分别为27和48.1 MPa,均远超C25混凝土抗压强度设计值,沉井结构偏于危险。从井壁的应力等值线图中也可以看出,由于孤石的影响,应力等值线集中在井壁下方和刃脚接触处,应力集中现象明显。若先破除孤石再开挖土体,井壁和刃脚处的最大应力值随深度增加而小幅增加,虽然土体开挖会造成应力重分布,但由于此时孤石已被破除,所以没有出现较大的应力集中,井壁和刃脚应力值均在C25混凝土抗压强度设计值之内。说明整个施工过程中,刃脚下方出现孤石时,为避免井壁和刃脚进一步开挖下沉时出现损坏,应采取先破除孤石后开挖下沉的施工方法。

5 处理措施

沉井施工应结合特定的地质条件和自身的结构特征,采用因地制宜的施工方法。针对前期施工中出现的问题,结合井壁及刃脚应力的计算结果,后续施工中应采取下列几点措施。

沉井在砂砾石地层下沉过程中,应及时纠偏,由第3节计算结果可知,若沉井偏移倾斜严重时,井壁挤压土层,一侧的土压力由静止土压力转变为被动土压力,使井壁受力大幅增大,另一侧由静止土压力转变为主动土压力,井壁外侧荷载不均匀性加剧,一旦超过界限深度,井壁会发生开裂,不利于沉井施工的安全。当

出现偏移倾斜情况时,可通过在沉井滞后沉降的部位或超前沉降的部位施加或减小水平分力和竖直分力,形成和倾斜方向相反的力矩进行纠偏,待其正位后,再均匀分层取土下沉。如:井内取土偏挖,在刃脚较高一侧加大开挖量,较低一侧适当回填砂石;采用千斤顶在倾斜一侧施加水平力,在另一侧井壁顶部施加载荷;可在沉井倾斜一侧地表填土并夯实以增加反向倾斜土压力。

由含孤石地层沉井下沉施工方法数值模拟对比结果看出,应将前期先开挖土体再破除孤石的下沉开挖方法调整为先破除孤石再开挖土体,调整后可大幅降低沉井井壁和刃脚应力,应力值均在 C25 混凝土抗压强度设计值之内,避免了井壁和刃脚出现破坏。当沉井刃脚踏面下方出现孤石,沉井难以下沉时,对于体积较小的孤石,可直接进行掏挖或液压油锤破碎后掏挖,对于体积较大的孤石,可先钻探测孔,以确定孤石位置以及粒径大小,再利用手风钻分层造孔进行小药量弱爆破,以减轻爆破对刃脚内混凝土的影响,并保证每次爆破孤石的高度在 0.3 m 以下,这样便于控制沉井单次下沉高度和下沉速度,孤石分层依次清理完毕后,尽量确保沉井刃脚踏面与土体接触良好,受力点分布均匀。接下来对已变形的刃脚钢板进行切割,将刃脚内部已破碎的混凝土全部掏空,重新焊接好钢板后从预留孔中灌入混凝土,待混凝土达到设计强度后,同时保证焊接加固后刃脚底部的整体刚度,方可继续开挖下沉,这是刃脚不被损坏,顺利下沉的前提。

沉井井壁与周围地层出现脱空情况时,可向空隙中回填黏性土或颗粒较小的砂砾石封堵空隙,这样能增大侧壁摩阻力,使井壁受力更均匀并防止沉井偏移和倾斜的加剧,同时能防止基坑侧向坍塌。回填过程中,应先将刃脚处脱空部分封堵密实,再向井壁内回填土石料,避免出现回填料沿刃脚空隙处流回井内。

采用以上施工处理措施,对前期施工中出现的問題以及不当的施工方法进行了修正和调整,保证了沉井安全顺利地下沉到设计标高。

6 结 语

(1) 针对该沉井前期施工中出现的井身整体偏移倾斜、刃脚出现鼓胀变形及井壁与砂砾石层部分脱空等问题进行了成因分析。

(2) 根据沉井施工时的下沉状态,分别按静止土压力和被动土压力考虑井壁所受侧向土压力,对井壁进行了应力解析分析,分析表明,施工时要及时纠偏,若沉井偏移倾斜严重,井壁挤压土层一侧土压力由静止土压力转变为被动土压力,使得井壁受力大幅增大,并超过 C25 混凝土抗压强度设计值范围,不利于沉井施工安全。

(3) 通过有限元数值方法对有孤石存在时井壁及刃脚的强度进行了复核,结果表明,当沉井下沉过程中,刃脚下出现孤石后,只要后续施工方法合理,即选择先破除孤石再开挖土体的下沉施工方法,可大幅降低井壁及刃脚的应力值,避免因刃脚下土体被掏空,部分刃脚处于孤石单点支撑,应力集中过大而造成井壁和刃脚破坏的情况。

(4) 对前期不当的施工方法进行了调整,采用改进的先破除孤石再开挖土体的下沉开挖方法后,保证了沉井安全顺利下沉到设计标高。

参 考 文 献:

- [1] 穆保岗,朱建民,牛亚洲. 南京长江四桥北锚碇沉井监控方案及成果分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2): 269-274. (MU Bao-gang, ZHU Jian-min, NIU Ya-zhou. Monitoring and analysis of north anchorage caisson of Fourth Nanjing Yangtze River Bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(2): 269-274. (in Chinese))
- [2] CHAKRABARTI S K. Design, construction, and installation of a floating caisson used as a bridge pier[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 2006, 132(3): 143-156.
- [3] LEFLER F E. Reinforced concrete caissons for port structures in Spain[J]. Maritime Engineering, 2009, 162(2): 73-81.
- [4] 黄海鸥,孙晓伟. 复杂地质区域超深沉井群施工技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增1): 2957-2963. (HUANG Hai-ou, SUN Xiao-wei. Subsidence construction technology for ultra-large-scale caissons foundation in complex geological area

- [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(Suppl1): 2957-2963. (in Chinese))
- [5] SARAN S, BHANDARI N M, AL-SMADI M M A. Analysis of eccentrically obliquely loaded ring footings on sand[J]. Indian Geotechnical Journal, 2003, 33(4): 422-446.
- [6] 王红霞, 王德禹. 大型沉井结构施工力学模型的研究[J]. 力学季刊, 2003, 24(1): 68-74. (WANG Hong-xia, WANG De-yu. Mechanics model study of large extra caissons construction[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2003, 24(1): 68-74. (in Chinese))
- [7] 李伟雄. 基于被动土压力的沉井结构分析[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1341-1345. (LI Wei-xiong. Analysis of structure of passive earth pressure on open caisson[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(11): 1341-1345. (in Chinese))
- [8] 朱建民, 龚维明, 穆保岗, 等. 超大型沉井首次接高受力变形规律初探[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2055-2060. (ZHU Jian-min, GONG Wei-ming, MU Bao-gang, et al. Research on stress and settlement of super-large open caisson during first lifts[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2055-2060. (in Chinese))
- [9] HONG W P, YEA G G, KIM T H, et al. Evaluation of unit skin friction to large size pneumatic caisson during the process of sinking[C]// Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2005: 555-561.
- [10] 陈晓平, 茜平一, 张志勇. 沉井基础下沉阻力分布特征研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(2): 148-152. (CHEN Xiaoping, QIAN Ping-yi, ZHANG Zhi-yong. Study on penetration resistance distribution characteristic of sunk shaft foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(2): 148-152. (in Chinese))
- [11] 王建, 刘杨, 张煜. 沉井侧壁摩阻力室内试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 659-666. (WANG Jian, LIU Yang, ZHANG Yu. Model test on sidewall friction of open caisson[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(3): 659-666. (in Chinese))
- [12] 梁槁嫁, 徐伟, 徐赞云. 沉井下沉时土压力和侧壁摩阻力分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(12): 1826-1832. (LIANG Se-jia, XU Wei, XU Zan-yun. Earth pressure and frictional resistance analysis of open caisson during sinking[J]. Journal of Tongji University(Nature Science), 2014, 42(12): 1826-1832. (in Chinese))
- [13] 陶建山. 泰州大桥南锚碇巨型沉井排水下沉施工技术[J]. 铁道工程学报, 2009, 124(1): 63-66. (TAO Jian-shan. Construction technology of draining-sinkage for south caisson anchorage to Taizhou Yangtze River highway bridge with large-sized sunk well[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009, 124(1): 63-66. (in Chinese))
- [14] 张鸿, 刘鹏, 肖文福. 泰州大桥中塔深水超深巨型沉井施工技术[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(增1): 559-563. (ZHANG Hong, LIU Peng, XIAO Wen-fu. Construction technology of super-large deepwater caisson of middle tower of Taizhou Bridge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(Suppl1): 559-563. (in Chinese))
- [15] 邓友生, 万昌中, 闫卫玲, 等. 大型圆形沉井结构应力及其周边沉降计算[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 502-508. (DENG You-sheng, WAN Chang-zhong, YAN Wei-ling, et al. Stress of large cylindrical caisson structure and its adjacent settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 502-508. (in Chinese))
- [16] BOUSHEHRIAN J H, HATAF N. Experimental and numerical investigation of the bearing capacity of model circular and ring footings on reinforced sand[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2003, 21(4): 241-256.
- [17] 陈策. 泰州大桥中塔沉井振动数值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2012(2): 1-7. (CHEN Ce. Numerical simulation of vibration for Taizhou Bridge middle tower caisson[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(2): 1-7. (in Chinese))
- [18] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 63-64. (XU Zhi-lun. A concise course in elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 63-64. (in Chinese))
- [19] 上海市市政工程设计研究院. 给水排水工程钢筋混凝土沉井结构设计规程[M]. 北京: 中国工程建设标准化协会, 2002: 6-8. (Shanghai Municipal Engineering Design Institute. Specification for structural design of reinforced concrete sinking well for water supply and sewerage engineering[M]. Beijing: China Association for Engineering Construction Standardization, 2002: 6-8. (in Chinese))

Mechanical characteristics of large caisson for surge shaft and its improvement of construction methods

PAN Feng¹, DANG Fa-ning¹, LU Liang², DUAN Bin³, YANG Xiao-mei³

(1. *Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*; 2. *Gansu Institute of Architectural Design and Research, Lanzhou 730030, China*; 3. *Northwest Engineering Corporation Limited of Power China, Xi'an 710065, China*)

Abstract: In view of the special problems encountered in large caisson for the surge shaft construction in sand gravel overburden, a hydropower project is taken as an example. Considering large scale of the caisson, the poor uniformity of formation, the quantity of boulders and it was greatly effected by the formation property and construction factors, and the well wall being deviation and inclination, failure of the cutting edge and the well edge disengagement from formation during prophase construction which had seriously affected the construction safety, firstly, the problems of construction and their genesis were both analyzed. After then the change law of caisson wall earth pressure during construction is compared by an analytic method, the analysis results show that the earth pressure changed from static earth pressure to passive earth pressure when the deviation of the caisson appeared, and the well wall was not reliable in this case. Finally, the construction method for the caisson in the formation which contained boulders was compared by a numerical method during the sinking process, the analysis results show that adjusting the prophase sinking excavation method for the caisson to breaking boulders at first, then excavating soil, it can remarkably reduce the stress values of the caisson, effectively avoid the destruction of well wall and the cutting edge. Thus the improvement construction method for a large caisson of the surge shaft was proposed, which can be applied to same hydropower works under the special geological conditions.

Key words: caisson; deviation and inclination; boulders; well wall disengagement