

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.018

伞形水塔拆除爆破关键参数计算与数值模拟*

叶家明¹,戴春阳²,李洪伟^{1,3},刘伟^{1,3}

(1.安徽理工大学 化学工程学院,淮南 232001;2.安徽天明爆破工程有限公司,滁州 239000;
3.安徽省爆破器材与技术工程实验室,淮南 232001)

摘要: 在拆除某市区内的废弃伞形水塔的过程中,为了确定合理的爆破缺口关键参数,通过应力条件计算出水塔爆破缺口的圆心角大小和刚度条件计算出水塔爆破缺口高度,并基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,对水塔的定向倒塌进行数值模拟。模拟结果表明:通过应力条件及刚度条件计算出的爆破缺口圆心角大小及缺口高度使得水塔符合预期倒塌效果;当在水塔拆除的实际施工设计中,采用经验公式得到的爆破缺口不能实现水塔的顺利倒塌,同时,数值模拟分析也验证了水塔不能倒塌的结果。因此,水塔拆除爆破关键参数计算方法及数值模拟对实际工程具有理论指导意义。

关键词: 伞形水塔; 应力条件; 刚度条件; 定向倒塌; 数值模拟

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0106-05

Calculation and Numerical Simulation of Key Parameters for Demolition Blasting of Umbrella Shaped Water Tower

YE Jia-ming¹, DAI Chun-yang², LI Hong-wei^{1,3}, LIU Wei^{1,3}

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Tianming Blasting Engineering Co Ltd, Chuzhou 239000, China; 3. Engineering Laboratory of Explosive Materials and Technology of Anhui Province, Huainan 232001, China)

Abstract: In the process of demolishing an abandoned umbrella shaped water tower in an urban area, the center angle and height of the blasting cut of the water tower is calculated based on the stress conditions and rigidity conditions respectively, in order to determine the reasonable key parameters of the blasting cut. The directional collapse of the water tower is simulated by the ANSYS/LS-DYNA. The results show that the calculated center angle and height of by the stress and stiffness conditions make the collapse process of the water tower conform to the expected effect. Whereas in the actual construction design of the demolition of water tower, the parameters of blasting cut obtained by the empirical formula cannot achieve the collapse of the water tower, and the numerical simulation results also verify this conclusion. In summary, the calculation method and numerical simulation of the key parameters for demolition blasting of water a tower have theoretical significance in practical engineering.

Key words: umbrella shaped water tower; stress condition; stiffness condition; directional collapse; numerical simulation

收稿日期:2020-07-12

作者简介:叶家明(1995-),男,在读硕士,从事爆破理论与技术研究,(E-mail)1006282017@qq.com。

通讯作者:李洪伟(1979-),男,硕士、教授,从事爆炸技术及应用研究方向研究,(E-mail)lihwa@ust.edu.cn。

基金项目:安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0123)

随着时代的不断发展,科技的不断更新迭代,城市中的水塔也失去了其应有的价值。这些水塔多为年久失修,存在较大安全隐患。为了消除安全隐患并且使城市有限的土地资源得到更好的利用,水塔

的拆除成为必然趋势。大多数水塔是由一个储水装置和一个圆形的筒,但因其筒体高度大,重心较高,支撑筒壁较薄,所以通过机械拆除难度系数大,爆破因其安全、高效并且经济所以经常用于水塔拆除中。

牛玉学等通过对水塔自身结构的特点及场地条件的分析,根据同类工程的施工经验确定切口圆心角,并没有进行相关的理论计算^[1]。邓永兴等在水塔拆除过程缺口圆心角的选取中也是通过经验公式进行计算选取的^[2]。周凤仪分析了一个按照经验公式设计参数导致水塔未能倒塌的案例,其主要原因就是未能分析水塔钢筋布局,直接用经验公式设计参数^[3]。谢先启等通过一般工程经验,得出爆破切口高度和缺口大小,精细化设计,成功拆除了38 m的倒锥形钢筋砼水塔^[4]。谢瑞峰等通过经验公式,壁厚与切口高度的一定关系及切口长度与筒体周长的关系得出相应的切口高度和切口长度,成功拆除水塔^[5]。张松峰等人通过水塔的结构和实际受力情况及钢筋的失稳情况及经验公式得出爆破切口长度和高度,成功拆除水塔^[6-8]。

国内有些爆破拆除城市复杂环境下的水塔的案例中,主要的相关参数大多是通过经验公式得到的,并没有通过理论计算来进行分析,有些能够一次性成功爆破拆除水塔,而有些因为爆破关键参数选择不合理,不能安全拆除水塔,带来安全隐患。故选择合理的切口圆心角大小、切口高度是水塔拆除的关键,它对爆破效果和爆破安全起到直接的影响,所以本文将通过对切口形成时钢筋混凝土的应力相关力学计算来确定切口圆心角的大小,通过刚度条件来确定切口的高度,并运用到水塔拆除中。

1 爆破切口相关参数的计算

1.1 爆破切口圆心角的计算

水塔拆除方案中最常见的就是定向倾倒,拆除施工方便,倒塌效果也比较好。在水塔拆除过程中,对于切口的选择一般是使用正梯形或倒梯形切口。在拆除爆破水塔时,由于梯形切口的底部界面会相对薄弱,在切口形成后最先遭到破坏,所以对切口底部截面处进行着重分析。假设爆破切口圆心角为 α ,其圆心角对应的弧长为 L ,剩余截面的圆心角为 β ,如下图1所示^[9]。

(1) 爆破切口生成后,剩余支撑体截面面积为

$$A = 2 \int_r^R \int_0^{\alpha/2} \rho d\rho d\theta = (R^2 - r^2)(\beta/2) \quad (1)$$

(2) 剩余支撑截面的偏心距计算

$$e = \frac{1}{A} \int X dA = \frac{1}{A} X dA = \frac{2}{A} \int_r^R \int_0^{\alpha/2} \rho^2 \cos\theta d\rho d\theta =$$

$$4 \{ (R_1^3 - r_1^3) \sin(\alpha/2) / [3(R_1^2 - r_1^2)\beta] \} \quad (2)$$

考虑到水塔拆除的钢筋因素,用下式计算 e

$$e = 2(R_1^2 + r_1^2 + R_1 r_1) \sin(\alpha/2) / [3(R_1 + r_1)(\pi - \alpha + \mu W)] \quad (3)$$

式中: μ 为切口断面的配筋率; d 为钢筋直径; n 为整个切口截面内钢筋的数量; W 为面积折算比, $W = \frac{E_{钢筋}}{E_{混}}$ 。

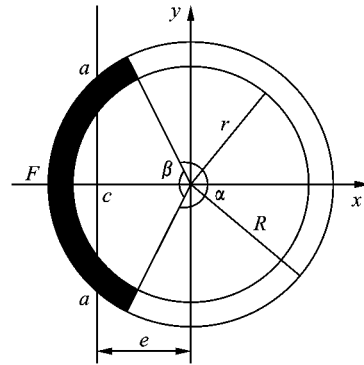


图1 水塔切口横截面图

Fig. 1 Cross section of water tower cut

(3) 剩余支撑部分截面对形心主轴的惯性矩

$$I = 2 \int_{r_1}^{R_1} \int_0^{\beta/2} (\rho \cos\theta - e)^2 \rho d\rho d\theta = (1/8)(R_1^4 - r_1^4)(\beta + \sin\beta) - (8/9)(R_1^3 - r_1^3)2 \sin^2(\beta/2) / [\beta(R_1^2 - r_1^2)] \quad (4)$$

式中: r_1 为钢筋到水塔筒心的距离; R_1 筒体外壁到水塔筒心的距离。

(4) 在水塔倾倒初始时,倾动力矩等于偏心距 e 与重力 mg 的乘积

$$M = mge = 4mg \{ (R_1^3 - r_1^3) \sin(\beta/2) / [3(R_1^2 - r_1^2)\beta] \} \quad (5)$$

式中: M 为倾动力矩; m 为水塔爆破切口以上部分的质量。

(5) 取水塔切口截面受拉区端点 F 所受到的拉应力与混凝土的极限抗拉强度相等的阶段,即为极限平衡状态。根据材料力学理论,结构偏心受压, F 点应力为^[10,11]

$$\sigma_F = \frac{M(r_1 - e)}{I} - \frac{mg}{A} \quad (6)$$

F 点处1个壁厚材料的面积为^[12]

$$S = R_1^2 \arccos \frac{r_1}{R_1} - r_1 \sqrt{R_1^2 - r_1^2} \quad (7)$$

该处1个壁厚材料的最大抗拉能力为

$$F_{max} = S f_{ct} + S \mu_0 f_{st} \quad (8)$$

式中: f_{ct} 为混凝土的极限抗拉强度; f_{st} 为钢筋极限抗拉强度; μ_0 为该点处的配筋率。

所以

$$f_{bt} = \frac{F_{max}}{S} = f_{ct} + \mu_0 f_{st} \quad (9)$$

在这种极限平衡状态下,应力条件为

$$\frac{M(r_1 - e)}{I} - \frac{mg}{A} = f_{ct} + \mu_0 f_{st} \quad (10)$$

同时,受压区的最大压应力也应该满足

$$\frac{M\left(-r_1 \cos \frac{\beta}{2} + e\right)}{I} - \frac{mg}{A} \leq f_{bc} \quad (11)$$

式中, f_{bc} 为混凝土的抗压强度。

通过应力条件对上面式(1)到式(11)的式中综合运用计算,可以计算出爆破切口圆心角 α 的值。

1.2 水塔爆破切口的高度设计计算

根据刚度要求计算切口高度,钢筋混凝土爆破时,一般只使钢筋周围的混凝土脱离钢筋,切口处的钢筋还支撑着建筑上部结构的重量。如果爆破切口的高度不够,而钢筋支撑力足够大时,依然可以使钢筋混凝土高耸建筑物炸而不倒。因此,要保证钢筋混凝土高耸建筑物爆破后倒塌,切口处裸露钢筋的长细比应大于规范规定的长细比,即^[13]

$$\lambda \geq [\lambda] \quad (12)$$

式中: λ 为钢筋的长细比; $[\lambda]$ 是钢结构设计规范所规定的长细比,一般取 $[\lambda] = 150$ 。根据材料截面的几何特性的计算公式,钢筋的长细比为

$$\lambda = \mu h / i \quad (13)$$

式中: μ 是轴心压杆计算长度系数,刚性固定时 $\mu = 0.5$; h 是爆破切口高度, mm; i 是钢筋截面回转半径, $i = d/4$, 而 d 为钢筋直径, mm。

将式(13)带入式(12)中得

$$h \geq d[\lambda] / (4\mu) \quad (14)$$

综上式(1)到式(14),可以计算得到水塔拆除中的关键参数切口圆心角和切口高度的数值,对拆除方案设计中起到理论支撑。

2 水塔拆除的数值模拟

2.1 工程概况

拟拆除水塔的主体为钢筋混凝土结构,地面以上至水塔伞盖底端高度为 27 m,建筑高度 33 m,水塔重量为 132.5 t,重心高度为 16.5 m,水塔底部外半径为 1.26 m,内半径 1.04 m,壁厚 0.22 m,底部配置单层间距为 10 cm 的 $\phi 22$ II 级钢筋为主筋,配筋率为 0.2%。见图 2、图 3。

2.2 建模过程

根据现场的实际环境,选择在水塔下端 0.5 m 以上布置炮孔,形成爆破缺口。缺口上部自重为 1298.5 kN,混凝土的极限抗拉强度 2 MPa,混凝土

极限抗压强度为 20 MPa,钢筋极限抗拉强度为 360 MPa。根据上述式(1)到式(14),计算可得缺口对应的圆心角为 235° ,切口高度为 1.65 m。切口下部长度为 5.17 m,切口上部取切口截面周长的 1/2,为 3.96 m。



图 2 爆区环境图

Fig. 2 Environment map of explosion area

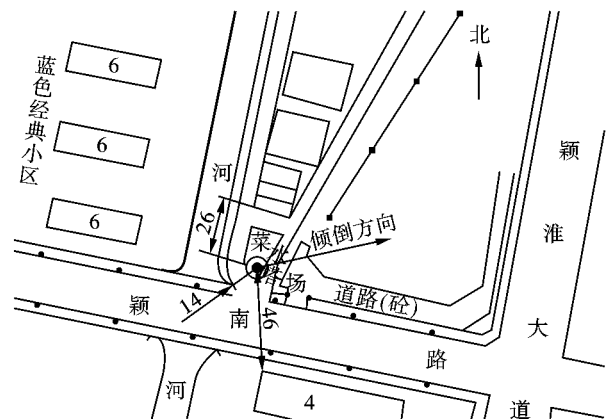


图 3 爆区环境示意图(单位:m)

Fig. 3 Schematic diagram of explosion zone environment(unit: m)

本次建模使用 ANSYS/LS-DYNA 软件,采用整体式模型对钢筋混凝土结构进行分析,水塔整体使用 SOLID164 实体单元, * MAT BILINEAR ISOTROPIC 材料模型。因为不必测量地面的震动速度,减少计算的时间和工作,所以选用刚体作为地面材料。水塔和地面的界面采取 LS-DYNA 里面存在的主动单面触碰演算模型。通过设置模型中缺口材质的失效时长,缺口材料在 1 s 时失效,模拟水塔的拆除爆破。

水塔倾倒的时间历程模拟如图 4 所示。

水塔的倒塌长度和水塔倒塌方向是否发生偏移可以从水塔顶部的关键节点的位移得出。取水塔顶部的关键节点,其位移如图 5 ~ 图 7。

通过图 5 得出,水塔顶部节点最大水平位移(X

轴)为35 m,水塔实际高度为33 m,水塔倒塌向前移动了2 m。通过图6得出,水塔顶部节点竖直方向(Y轴)最大位移为33 m,与水塔实际高度一致,倒塌充分。通过图7得出,水塔顶部节点侧方向(Z

轴)在倒塌触地前的最大位移为0.09 m,水塔按预期方向倒塌,未发生偏移。水塔整体倒塌效果符合预期,倒塌较好。

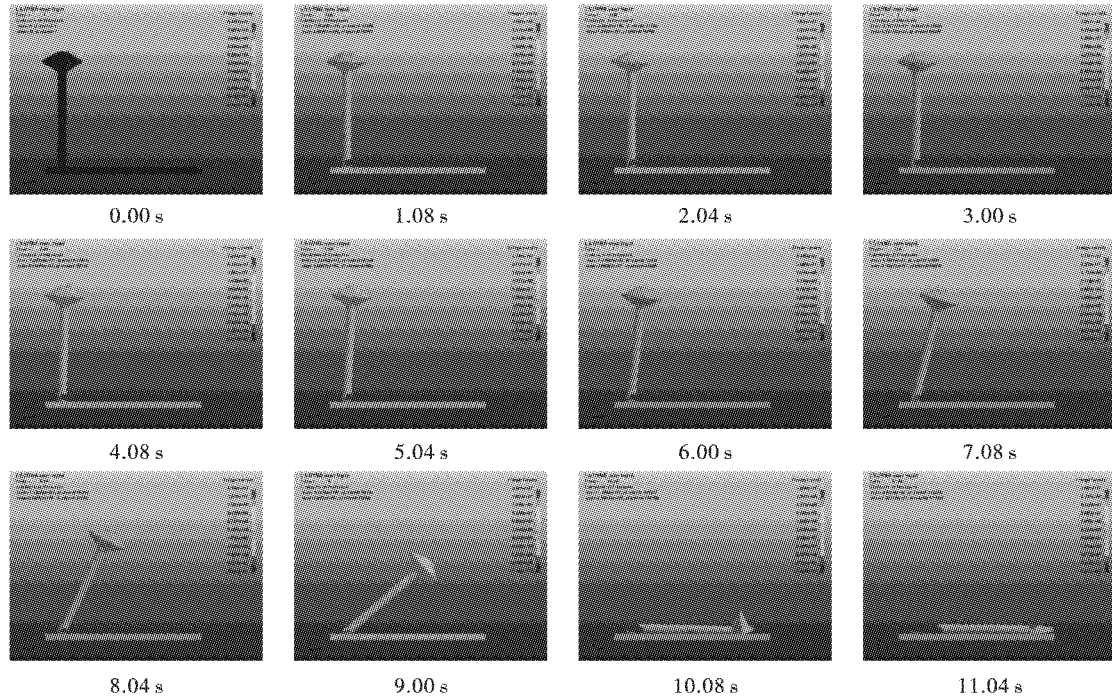


图4 水塔倾倒时间历程

Fig. 4 Time history of water tower dumping

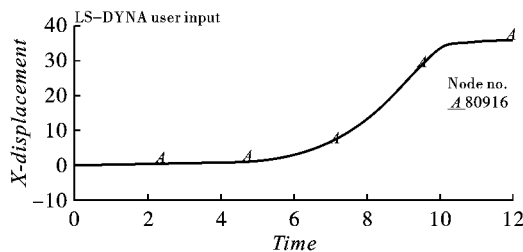


图5 水塔顶部节点倒塌方向(X轴)位移

Fig. 5 Collapse direction (X-axis) displacement of top node of water tower

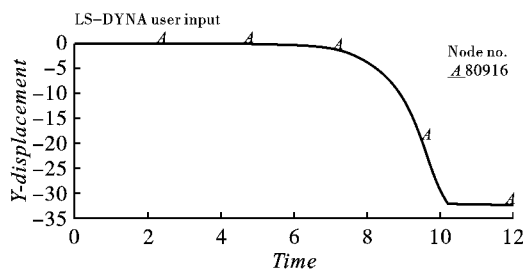


图6 水塔顶部节点倒塌方向(Y轴)位移

Fig. 6 Collapse direction (Y-axis) displacement of top node of water tower

2.3 工程实际操作和模拟

水塔在实际施工过程中,爆破缺口采用正梯形,

通过相关类似工程的经验公式得出爆破圆心角设计为 220° ,切口长度比为 $L/S = 0.61$,周长 S 为7.93 m,得到梯形大边爆破切口长度 L 为4.83 m,梯形切口短边长度 L_2 为3.96 m,梯形切口高度为1.2 m。

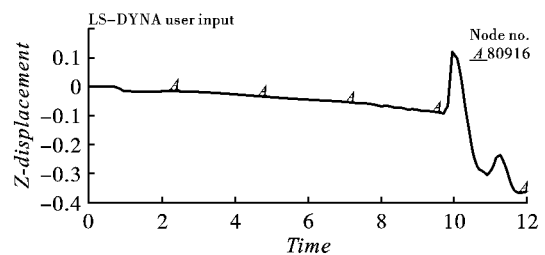


图7 水塔顶部节点倒塌方向(Z轴)位移

Fig. 7 Collapse direction (Z axis) displacement of top node of water tower

根据工程上述的设计进行施工,爆破结果如图8所示。

如图8所示,发现水塔爆破缺口中,钢筋已经发生大的变形,失去了承载能力,而支撑部分的混凝土未发生较大变形。剩余支撑部分强度仍能满足要求,水塔未能倒塌。

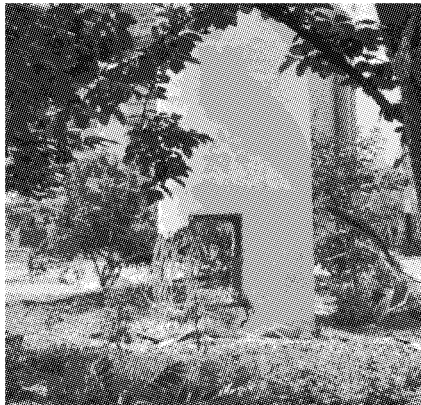


图 8 起爆后水塔示意图

Fig. 8 Schematic diagram of water tower after initiation

由于在爆破方案设计时,爆破缺口的圆心角为 220° ,开口角度较小,预留支撑部分过多,爆破后,水塔的倾覆力矩小于水塔的支撑力矩,未能发生倾倒。

根据其设计方案给定的参数,对水塔也进行数值模拟,如图 9 所示。

如图 9 所示,水塔在 2 s 时发生了及其微小的倾斜,但是在 8 s 时还是没有发生倾倒。与实际工程中的情形相符合。

而后在其在进行二次爆破时,在保证对称性的前提下,在定向窗的顶部外覆炸药,爆破后,水塔发生倾倒,效果达到预期。爆破后效果如图 10 所示。

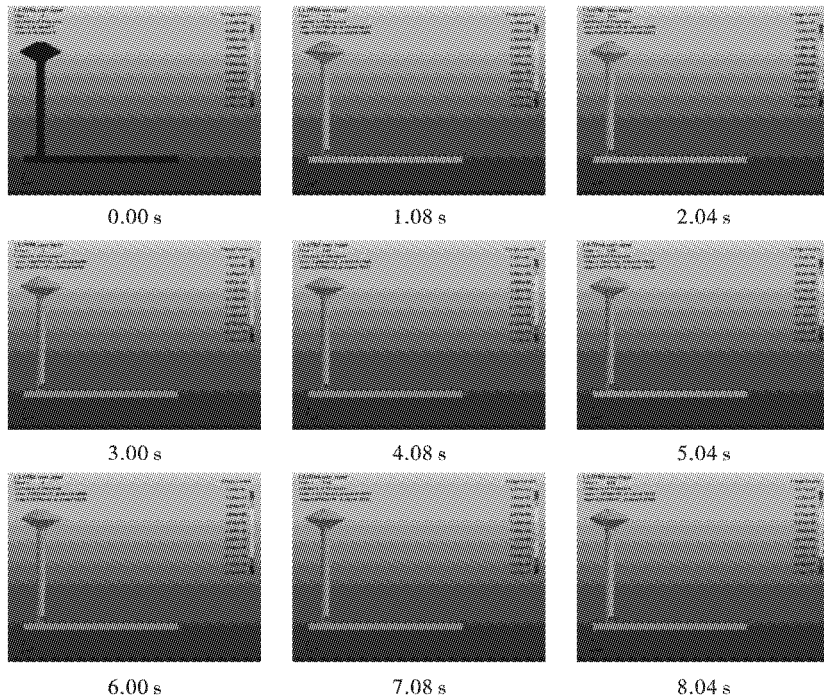


图 9 水塔倾倒时间历程

Fig. 9 Time history of water tower dumping

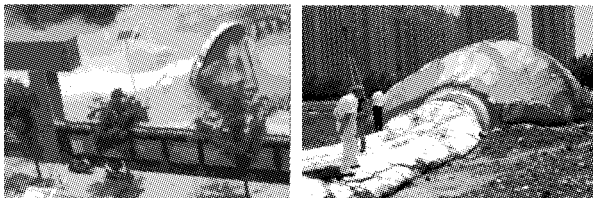


图 10 水塔倒塌后照片

Fig. 10 Photos after the collapse of water tower

好,与实际工程中二次爆破后水塔的倒塌效果相符。而运用经验公式得出的相关参数进行模拟的水塔未发生倒塌,与其实际施工中的实际情况是相符的。

在水塔拆除过程中,选用合适的计算方法得出的相关参数对水塔的成功拆除是至关重要的,运用应力条件和刚度条件计算水塔缺口圆心角大小及缺口高度等关键参数是可行有效的。利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对水塔拆除的模拟是行之有效的,对现场的实际施工具有指导意义。

3 结论

通过使用 ANSYS/LS-DYNA 软件对水塔倒塌过程进行模拟,运用应力条件和刚度条件计算得出的相关参数模拟的水塔顺利按预期倒塌,其倒塌效果比较