

地下油库锚喷支护拱顶圆筒罐室的设计与计算*

李晟,郑颖人,吴应祥

(后勤工程学院 土木工程系,重庆 401331)

摘要:随着地下工程锚喷支护的广泛应用,以及当前地下支护结构计算方法的提升,考虑到油罐罐室岩质条件好、拱顶圆筒结构受力好,为此提出采用拱顶圆筒锚喷支护结构形式取代当前钢筋混凝土结构,可有效提高工程的安全性、经济性和施工简便性。考虑到拱顶圆筒结构主要承受剪切应力与环向拉应力,为此对抗剪强度与抗拉强度同时进行了折减,并提出了剪切破坏和拉破坏两种安全系数。应用有限元强度折减法除计算剪切破坏安全系数外,还提出了计算拉破坏安全系数的方法。计算得到Ⅱ级围岩稳定安全系数远高于设计要求,Ⅲ级围岩也满足设计要求。在这一基础上提出了实用的锚喷支护结构形式与设计参数。研究表明,锚喷支护拱顶圆筒罐室结构是一种很有前景的结构形式,建议在工程上进一步试验与推广。

关键词:地下油库;锚喷支护;强度折减法

中图分类号:TU457

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)03-0737-09

Design and Calculation of Anchor and Shotcrete Support for Dome Cylinder Tank Room of Underground Oil Storage

Li Sheng, Zheng Yingren, Wu Yingxiang

(Dept. of Civil Engineering, LEU, Chongqing 401311, P.R. China)

Abstract: With the wide application of anchor-shotcrete support for underground engineering, the continual improvement of the calculation method for underground support structure, considering the good surrounding rock condition of underground oil storage, and the good mechanical characteristic of cylindrical structure, the anchor and shotcrete support of dome cylinder structure is proposed to replace the current reinforced concrete structure. The structure is safe, economic and simplicity in construction. On the basis of the dome structure mainly subjected to shear stress and loop tensile stress, two kinds of safety reserve factors were put forward to realize the reduction of the shear stress and loop tensile stress at the same time. The strength reduction method of Finite Element Method was used to calculate the shear safety reserve factor and tensile safety reserve factor at failure point. The safety serve factor of grade Ⅱ rock is much larger than designing requirement, and the grade Ⅲ rock also meets the designing requirement. On the above basis, this structure type and its designing parameters are advanced. The research shows that anchor and shotcrete support for dome cylinder tank room is most promising structure, and suggest making further test and spread.

Keywords: underground oil depot; bolt and shotcrete retaining; element strength reduction method

* 收稿日期:2016-10-27(修改稿)

作者简介:李晟(1992-),男,山西晋中人,硕士生,主要从事地下洞库稳定性与数值分析研究方面的工作。

E-mail:ls9206@126.com

基金项目:安徽省科技计划项目(1604a0802109);国家重点基础研究计划 973 项目(2014CB047103);国家自然科学基金(51279024)

0 引言

石油,作为工业的“血液”,关乎国计民生的命脉,是国家生存和发展不可或缺的战略资源,对保障国家经济和社会发展以及国防安全有着不可估量的作用。随着我国城镇化建设的发展,城市用地十分紧张,加上当前对城市安全、环保、绿色与防空要求大幅提高,城市中机场、码头、车站、商业供油和战备储油等油库采用地面油库模式已经不能满足要求。将油库转移到地下,可以节省用地面积、降低安全风险、净化环境,且深埋的地下油罐不受雷电、洪水、台风、滑坡等自然灾害的影响,还可以降低地震灾害,避免平时和战时的人为破坏,具有很高的抗震与防护能力。但建造地下油罐,工程造价高于地面油罐,施工复杂,工期长。如何降低工程造价,改善施工作业环境,加快施工进度,是当前地下油库建设中的一项重要任务。

目前,储存成品油的地下油库主要为山洞油库和平原地区覆土油库与岩层地基中的地下油库。结构形式一般为拱顶圆筒形结构,外面为钢筋混凝土罐室,内部为钢油罐。由于油库位置有较大的选择余地,通常选在岩质较好的Ⅱ、Ⅲ级围岩中,而且拱顶圆筒结构受力良好,因而当前广泛采用的钢筋混凝土罐室结构有进一步改进的空间。随着我国地下工程锚喷支护的广泛应用,以及当前地下支护结构计算方法的提升^[1-6],采用锚喷支护结构形式可以更加安全、经济,施工更加简便、快速。20 世纪 90 年代康宁等^[7-8]就提出用锚喷支护的方式取代传统的钢筋混凝土结构,但目前这种结构形式还没有得到广泛推广。近年来随着有限元极限分析方法的发展,可以准确提供罐室稳定安全系数的计算,能确保工程安全合理。本项研究拱顶圆筒锚喷支护罐室结构,设计其结构形式,并应用有限元极限分析方法对锚喷支护结构进行设计计算,以降低工程造价,增加安全与改善施工条件。

1 罐室结构尺寸与支护参数选取

在油库设计中,需要根据工程用途、油品性质、油库选址、储油容量、建设投资和建造材料等方面,综合考虑油罐形式。立式储罐作为主要储油设备,具有占地面积小、储罐容积大、结构受力好、工艺方便、投资小等优点。

立式储罐的公称容积在 100~20 000 m³不等,不同公称容积的储罐尺寸大小均不相等。在成品

油的地下油库中,2 000 m³、3 000 m³、5 000 m³、10 000 m³的储罐比较常见。本项研究以 2 000 m³罐为例,选用中国石化设计院拱顶油罐系列的相应尺寸,钢油罐具体尺寸如表 1。

表 1 立式钢油罐尺寸

Table 1 Dimension of the vertical steel oil tank						
公称 容积 /m ³	计算 容积 /m ³	钢材 总用 量/kg	底圈 板内 直径 /mm	拱顶 曲率内 半径 /mm	壁板 总高 /mm	罐总高 /mm
13 110	2 000	2 200	43 880	15 781	18 762	11 370

依据 2015 年《石油库设计规范》(GB50074—2014)的规定,覆土立式油罐的罐室球壳顶内表面与金属油罐顶的距离不应小于 1.2 m,罐室壁与金属罐壁之间的环形走道宽度不应小于 0.8 m,如图 1 所示。

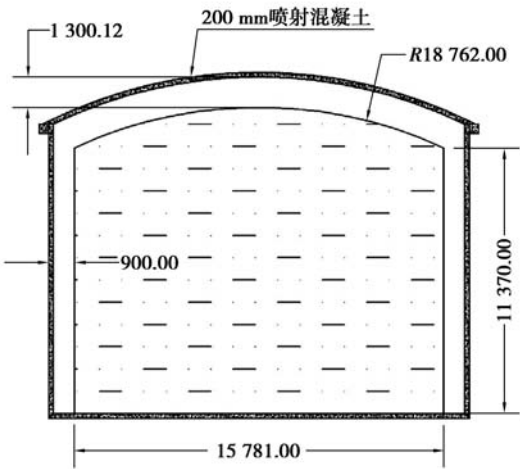


图 1 地下油库罐室尺寸

Fig.1 Dimension of the underground oil storage tank

当前,地下立式油罐罐室的主要结构形式为分离式拱顶直墙钢筋混凝土结构,这种结构形式工序复杂、劳动强度大、耗材多、造价较高。但罐室壳体顶部与围岩脱离,围岩表面没有保护,日后随着围岩的风化,围岩不稳定块体剥落,会对壳体结构产生极大的冲击,导致罐室拱顶与钢罐顶部破坏,严重时甚至会引发爆炸,导致严重事故。

随着岩石力学的发展和锚喷支护的应用,逐渐形成了支护与围岩共同作用的现代支护结构新奥法原理。锚喷支护通过锚杆和喷射混凝土与围岩共同形成一个弹塑性承载结构,能充分发挥围岩的自承能力,从而减少结构尺寸,并有效保护围岩,防

止围岩松散坠落,不仅可以降低工程费用、减少施工作业、提升施工速度、而且能降低工程风险。

依据罐室围岩条件良好,圆形洞室结构受力好的特点,在Ⅱ级围岩中,当洞跨不是很大时,可以不设圈梁和系统锚杆,只对某些偶见的的不稳定块体和罐帽和罐体的交界处采用局部锁边锚杆支护,选用构造配筋的200 mm的喷射混凝土对罐帽进行支护,配置构造筋的目的是增加罐帽的韧性,有利于防止不稳定块体塌落,(如图2(a))所示。罐壁采用150~200 mm的素喷射混凝土。在Ⅲ级围岩中,罐帽下部可设置配钢筋的圈梁,以防止拱顶环向发生拉破坏;若计算后受力良好也可不设圈梁。罐帽需要设置系统锚杆,罐壁顶部设置两排锁边锚杆,如(图2(b))所示,在罐壁与通道交界处设置局部锚杆。喷射混凝土厚度与Ⅱ级围岩相同。表2为出立式罐室锚喷支护初步建议参数。罐顶防水可在地下水处设置漏斗小水管引走,效果良好,喷层表面没有水迹;罐壁防水可在喷层内漏水处设置小水管引水,也可以在喷层上喷涂防水涂料或薄膜等措施,也可采用离壁防水。离壁距离应大于10 cm,护壁结构用混凝土预制块砌筑,并设圈梁,此时罐室直径应适当放大。

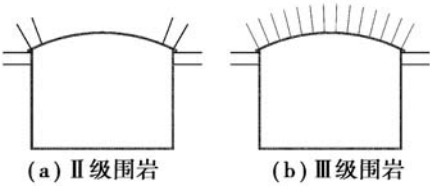


图2 不同围岩支护结构

Fig.2 Different surrounding rocks supporting structures

		围岩分级	
		Ⅱ级围岩	Ⅲ级围岩
拱顶	直径/mm	φ22	φ22
	孔距/mm	2.0	1.5
	排距/mm	2.0	1.5
	长度/mm	3.5~4.0	3.5~4.0
	罐帽下部布置	罐帽全部布置	
锚杆	两排锚杆	系统锚杆	
	直径/mm	φ22	φ22
	孔距/mm	2.0	1.5
	排距/mm	2.0	1.5
	长度/mm	3.5~4.0	3.5~4.0
侧壁	罐壁上部布置	罐壁上部布置	
	两排锚杆	两排锚杆	

续表 2

		围岩分级	
		Ⅱ级围岩	Ⅲ级围岩
拱顶	直径/mm	φ10~φ14	φ10
钢筋网	网格/mm	250×250	
喷层	拱顶	C30 喷射混凝土,厚 200	
	侧壁	C30 喷射混凝土,厚 150~200	
圈梁			环向钢筋 φ22,
			依据计算情况
		是否设置圈梁	

2 地下罐室的数值模拟与内力计算

对于岩体质量高、罐体结构受力好的地下油罐,采用锚喷支护的罐室结构有良好的前景。但由于以往没有科学的设计计算方法,难以确保工程安全,立式罐室锚喷支护结构形式没有得到推广应用。近年来,郑颖人等^[9]首次将有限元强度折减法应用于地下工程的设计计算,大幅度提高了计算的可靠性,为锚喷支护结构罐室提供了科学的计算方法。

2.1 模型的建立

下面以2 000 m³地下油罐罐室为例,依据当地地形埋深为40 m,对Ⅱ、Ⅲ级围岩中的油罐罐室进行设计计算。地下油罐是一个典型的三维空间问题,按空间模型计算。计算模型的边界条件:在z轴正向以自然地表为边界,取埋深40 m作为z轴正向的边界;洞侧边界以3倍洞径以外作为边界,在洞侧各取55 m作为边界;底部边界以3倍洞高以外作为边界,取60 m作为其边界。考虑到模型是轴对称结构,只需建立其1/4模型,如图3所示。

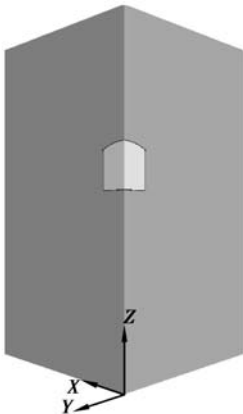


图3 地下油库罐室1/4模型

Fig.3 A quarter model of underground oil tank

计算模型中的围岩和混凝土衬砌的物理力学参数列于表 3。围岩强度参数依据各级围岩的稳定性反算得到,较为科学合理,Ⅲ级围岩强度低于当前我国隧道规范规定的强度,以确保工程安全。

表 3 围岩及混凝土衬砌材料参数

Table 3 Material parameters of surrounding rock and concrete lining

材料	弹性模量 E /GPa	泊松比 μ	重度 γ /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 c /MPa	内摩擦角 φ /($^{\circ}$)	抗拉强度 σ_t /MPa
Ⅱ级围岩	33	0.2	2 500	1.3	37	4
Ⅲ级围岩	10	0.25	2 500	0.3	32	0.8
C30 喷射混凝土	25	0.25	2 500	2.6	51	3

2.2 Ⅱ级围岩中锚喷支护罐室安全系数的判定

锚喷支护稳定安全系数的求解可采用有限元强度折减法。即通过降低围岩与喷层粘聚力、内摩擦角和抗拉强度,直至破坏,由此得到破坏时的强度参数,从而算出罐室稳定安全系数。

强度折减系数 ω 可表示为:

$$\tau = (c + \tan \varphi) / \omega = c' + \sigma \tan \varphi'$$

$$c = c' / \omega$$

$$\tan \varphi' = \tan \varphi / \omega$$

$$\sigma_t = \sigma'_t / \omega$$

式中: c' 、 $\tan \varphi'$ 分别为破坏时黏聚力与内摩擦系数; σ_t 、 σ'_t 分别为抗拉强度与破坏时的抗拉强度。

折减的倍数称为折减系数,它也是稳定安全系数。与一般拱顶直墙地下结构不同,罐室是一个环向受拉的结构,除要计算剪切破坏外,还要计算结构的环向拉破坏,所以不仅要考虑剪切破坏,还要考虑受拉破坏,需要对抗剪和抗拉强度都进行折减。

破坏时围岩强度本文采用 FLAC3D 程序和莫尔-库伦屈服准则进行模拟计算。Ⅱ级围岩罐室模型和网格划分如图 4 所示。

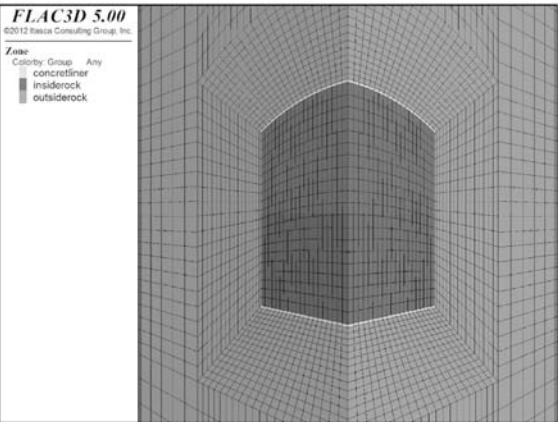


图 4 全断面开挖 1/4 空间模型及网格划分

Fig.4 A quarter of full-face excavation model and meshing

2.2.1 强度未折减($k_s = 1$)时罐室受力变形情况

通过数值计算,模型剪应变云图与位移云图如图 5、图 6 所示。由图可以看出,剪应变最大值分别出现在罐顶和罐壁与罐底和罐壁的交界处,罐顶发生向下的位移,罐底发生向上的位移。图 7 为模型开挖完成后的塑性区图,由图可知,模型尚未进入塑性,也未产生拉破坏。

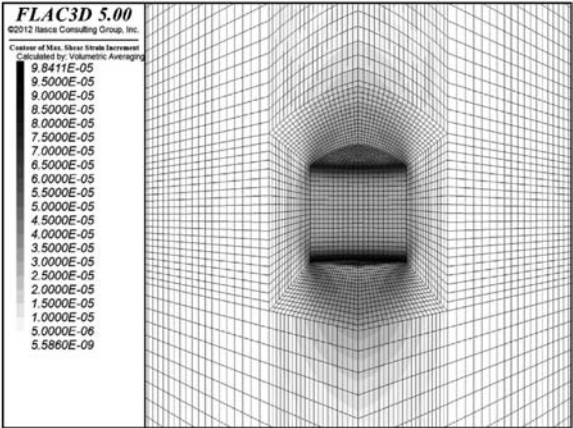


图 5 $k_s = 1$ 时剪应变云图

Fig.5 Shear strain nephogram at $k_s = 1$

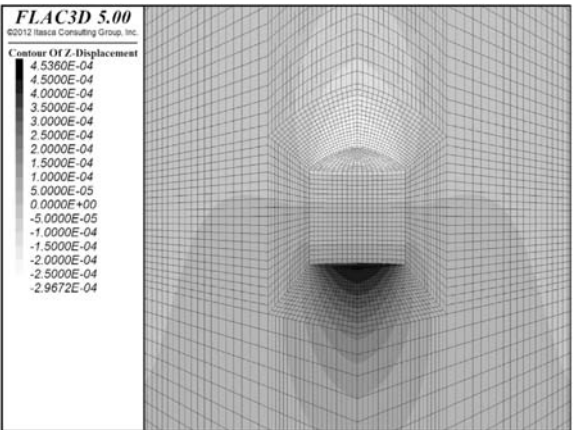


图 6 $k_s = 1$ 时位移云图(m)

Fig.6 Displacement nephogram at $k_s = 1$

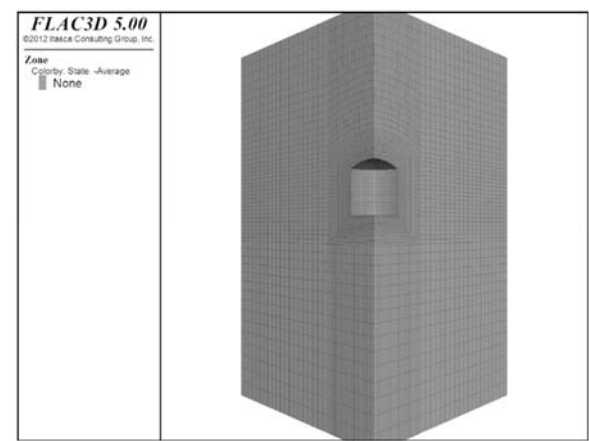


图 7 $k_s=1$ 时塑性区图

Fig.7 Plastic zone nephogram at $k_s=1$

2.2.2 剪切破坏安全系数

赵尚毅等^[10]总结了 3 种判定安全系

数的判据:一是依据从计算收敛到不收敛时作为破坏判据;二是依据位移计算发生突变作为破坏判据;三是依据塑性区是否贯通作为破坏判据,但它是必要条件而非充分条件,只能起到验证的作用。本文采用 3 种判据确定剪切破坏安全系数。

分别对粘聚力、内摩擦角和抗拉强度不断进行折减,使用 FLAC3D 记录监测点的最大不平衡力和的竖向位移时程曲线,以及破坏时的剪应变云图和单元塑性区与拉破坏图,以判断其安全系数。

当 $k_s=9.97$ 时,由最大不平衡力和拱顶位移记录曲线(图 8、图 9)可知,最大不平衡力趋于 0,拱顶位移时程曲线趋于稳定,表明计算收敛。当 $k_s=9.98$ 时,最大不平衡力不趋于 0,拱顶位移时程曲线不能稳定,表明计算不收敛,由此得到稳定安全系数 $k_s=9.97$ 。

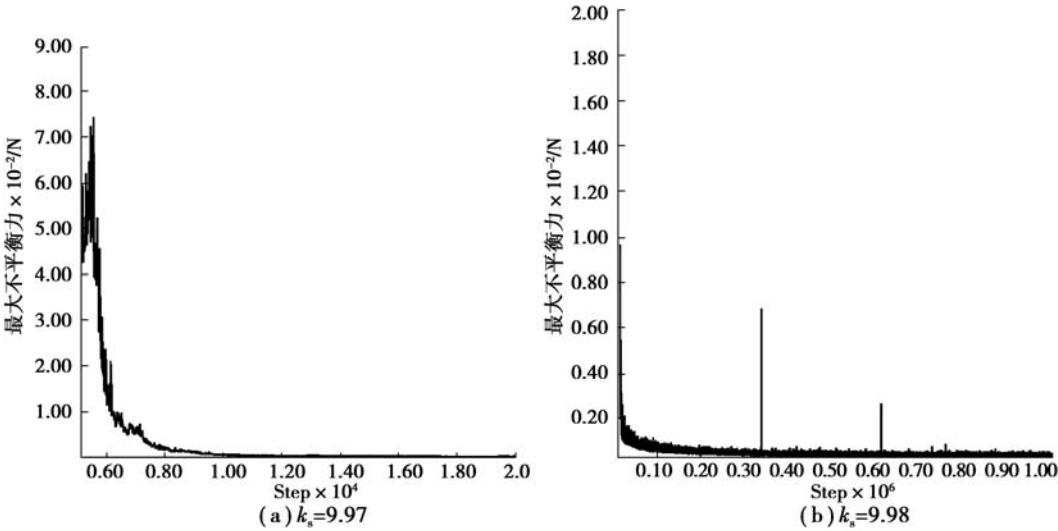


图 8 不同折减系数对应的最大不平衡力记录曲线

Fig.8 Maximum unbalance force curves for different reduction factors

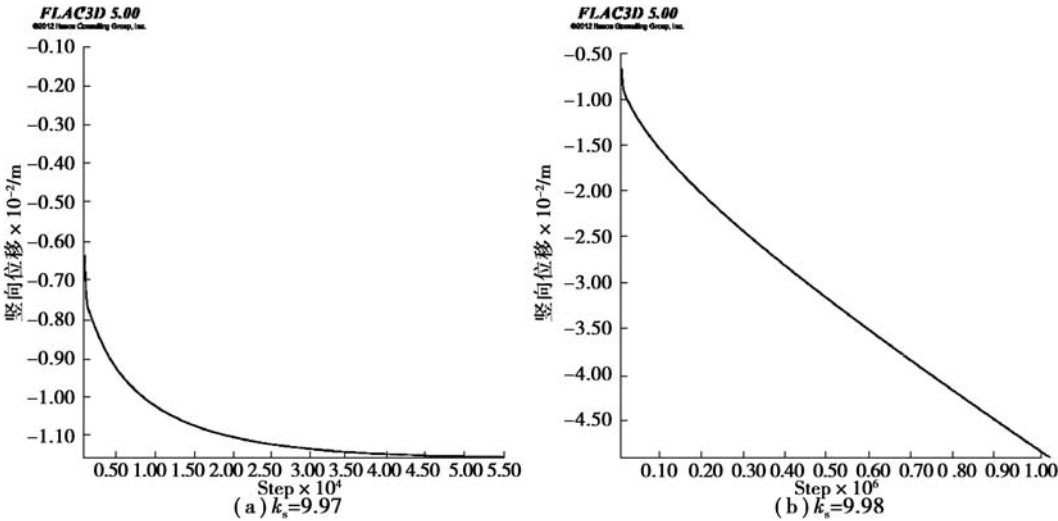


图 9 不同折减系数对应的拱顶位移记录曲线

Fig.9 Vault displacement curves for different reduction factors

安全系数还可以由拱顶位移突变和塑性区是否贯通进行判断。图 10 是折减系数-拱顶竖向位移关系曲线,由此也得到 $k_s=9.97$;图 11(a)是 $k_s=9.97$ 时的塑性区云图,塑性区从罐壁直到地表,塑性区贯通,也表明安全系数为 9.97。同时,由图可见塑性区直至地表,破坏为地表的塌陷。如果埋深增大,其安全系数还能增大。这么高的安全系数,表明罐室与围岩十分稳定,不会发生剪切破坏,只需施工时防止不稳定块体坠落。

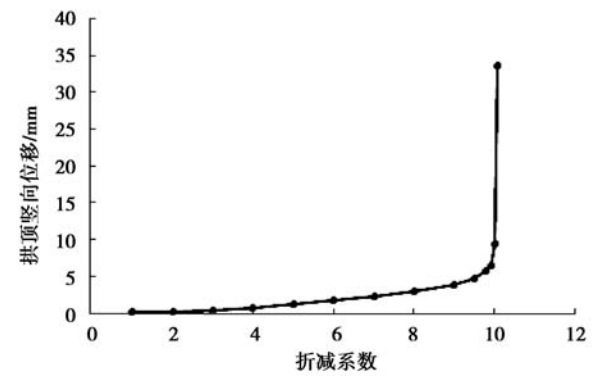


图 10 折减系数-拱顶竖向位移关系曲线

Fig.10 Vault displacement vs reduction factor curves

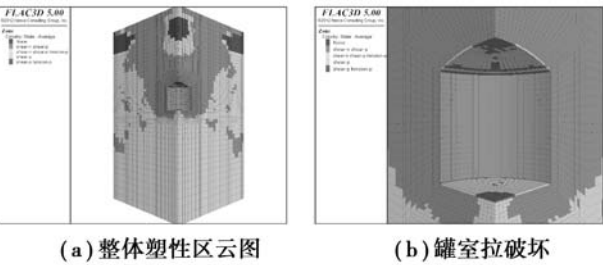


图 11 $k_s=9.97$ 时塑性区与拉破坏

Fig.11 Plastic zone and tension failure at $k_s=9.97$

2.2.3 拉破坏安全系数

由于拱顶与罐壁均会产生环向拉力,所以尚需监测拱顶与罐壁是否出现环向拉破坏。

由图 11(b)可知,模型在塑性区贯通前,在罐顶的喷射混凝土衬砌处(图中灰色部位)就出现了拉破坏。拉破坏呈环状分布在拱顶喷射混凝土衬砌上,表明在罐体发生剪切破坏之前,混凝土喷层就已发生了拉破坏。为算出拉破坏发生时的折减系数,重新进行强度折减。当 $k_s=8.34$ 时,拱顶尚未出现拉破坏(图 12(a)),而当 $k_s=8.35$ 时,拱顶开始出现局部拉破坏(图 12(b))。从安全考虑,以局部拉破坏出现作为拉破坏安全系数,由此确定

拉破坏安全系数为 8.34。可以看出,不论是剪破坏安全系数,还是拉破坏安全系数,都能判定罐室承载能力相当好,锚喷支护十分安全。

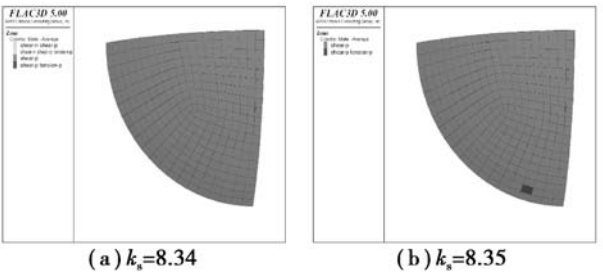


图 12 不同折减系数对应的拱顶拉破坏图俯视图
Fig.12 Top view of vault tension failure zone for different reduction factors

2.3 Ⅲ级围岩中锚喷支护罐室安全系数判定

对于岩质条件较弱的Ⅲ类围岩,考虑到岩质条件较差,可能存在较多的不稳定块体,需要在拱顶围岩上施做系统锚杆,以增加拱顶上围岩的整体性。通常锚杆对安全系数的提高作用不大,而在提高围岩的整体性、消除不稳定块体的影响方面有重大作用,但目前计算中难以体现这种作用,所以本次计算中不考虑锚杆的作用。

考虑到Ⅲ级围岩可能在罐帽下部出现较大环向拉力,在拱顶下部罐壁上方增设 600 mm × 400 mm 的环形圈梁(图 13)。通常设置钢筋混凝土圈梁,但施工费时费力,因此采用钢筋喷射混凝土圈梁取代。是否需要设置圈梁,还要看计算结果确定。

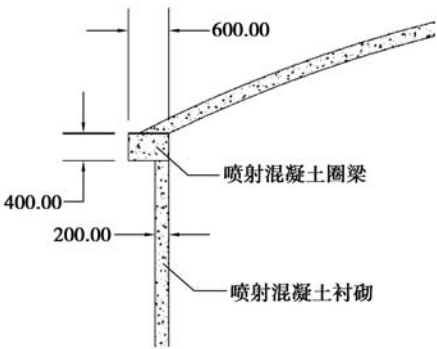


图 13 圈梁处切面图

Fig.13 Section of ring beam

用有限元强度折减法进行计算,在 $k_s=1$ 时,罐室模型的剪应变云图和竖向位移云图如图 14、图 15 所示。由图可见,罐室底部剪应变较大,罐顶向下位移,罐底向上隆起。

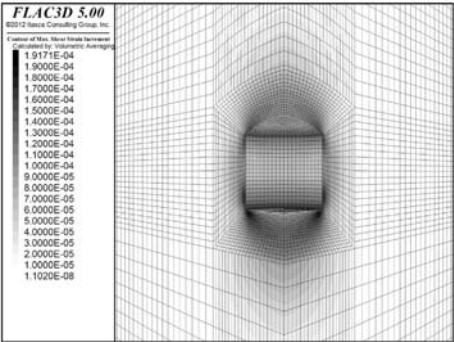


图 14 $k_s = 1$ 时剪应变云图

Fig.14 Shear strain nephogram at $k_s = 1$

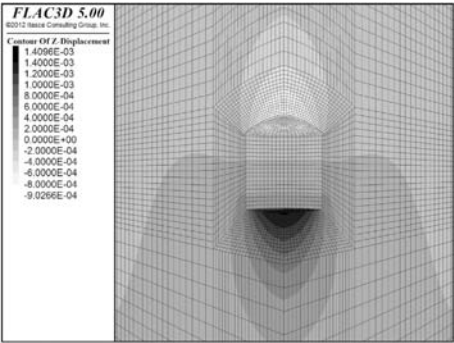


图 15 $k_s = 1$ 时竖向位移云图 (m)

Fig.15 Vertial displacement nephogram at $k_s = 1$

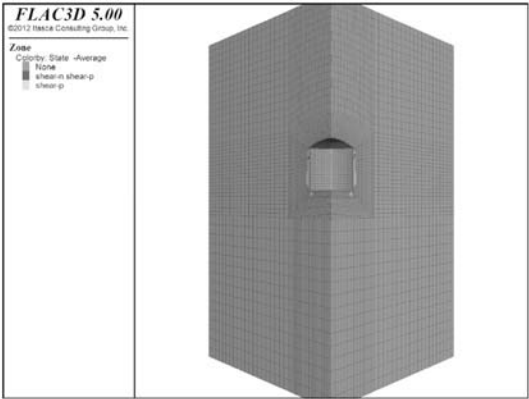


图 16 $k_s = 1$ 时塑性区云图

Fig.16 Plastic zone nephogram at $k_s = 1$

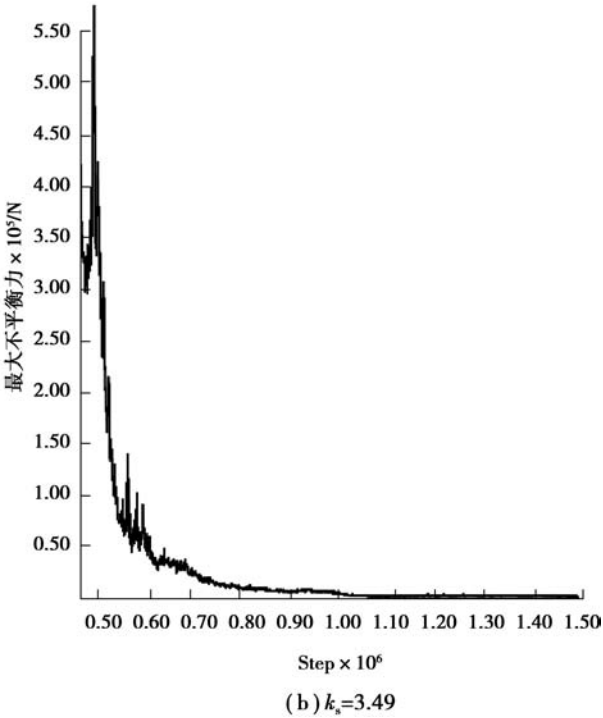
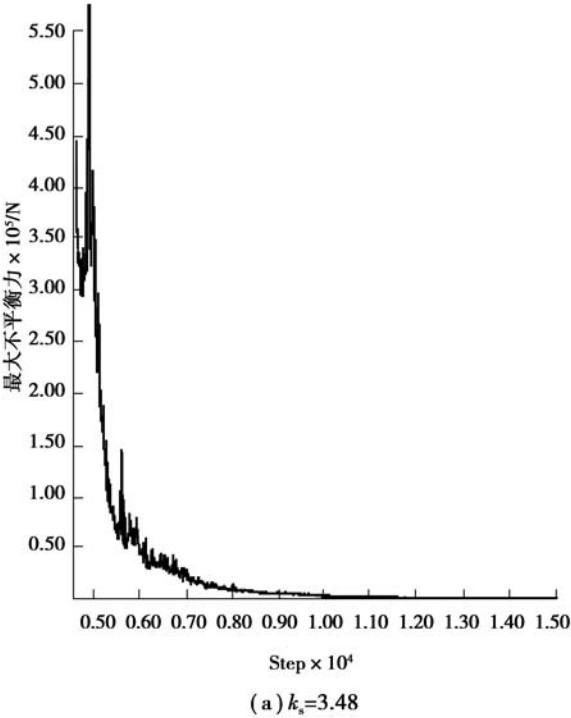


图 17 不同折减系数对应的最大不平衡力记录曲线

Fig.17 Maximum unbalance force curves for different reduction factors

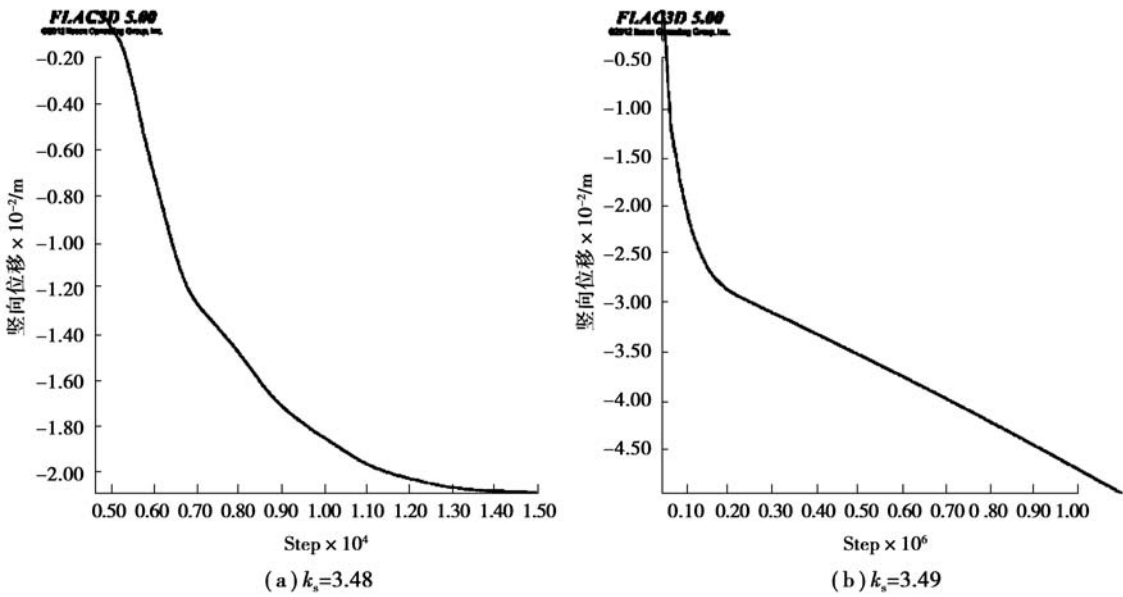


图 18 不同折减系数对应的拱顶位移记录曲线

Fig.18 Vault displacement curves for different reduction factors

采用折减系数-位移曲线判断(图 19)安全系数也为 3.48。由图 20 可见塑性区也贯通至地面,表明计算正确,此时罐室与围岩未发生拉破坏。其原因是,与Ⅱ级围岩相比,剪切安全系数较小,尚未达到拉破坏。

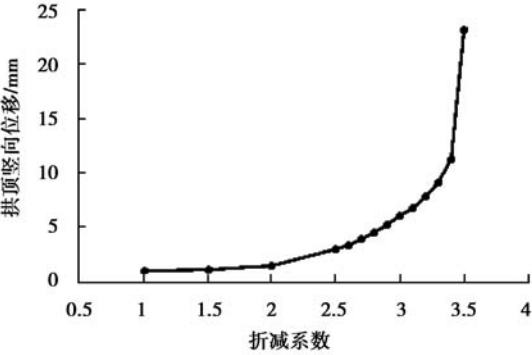


图 19 折减系数-拱顶竖向位移关系曲线

Fig.19 Vault displacement vs reduction factors curve

根据隧道设计规范,当安全系数大于 2.4 时,满足设计稳定性要求。可见,Ⅱ级围岩安全系数远远大于设计要求,Ⅲ级围岩也能满足设计要求。

2.4 地下罐室最终设计参数

上述数值模拟分析表明,无论罐室的剪破坏安全系数还是拉破坏安全系数,对Ⅱ级围岩远大于设计要求,因而可采用上述计算数据或略小于上述计算数据作为设计依据。拱顶采用配以构造钢筋的 200 mm 厚喷射混凝土支护;依据本次计算和以往离壁式罐壁经验,侧壁可采用不配筋的 150 mm 厚喷射混凝土支护;为增加安全,在拱顶与罐壁交界处设置 4 排锁边锚杆支护(图 2)。此外,在施工过程中若遇到不稳定块体,可以采用局部锚杆对不稳定块体进行加固。

Ⅲ级围岩的罐室安全系数比Ⅱ级围岩明显降低,但仍满足设计要求。Ⅲ级围岩不稳定块体较多,需要增设系统锚杆。在罐壁顶部增设两排锚杆,在罐壁与通道交界处设置局部锚杆。依据上述计算结果,可不设圈梁。拱顶采用配以钢筋网的 200 mm 厚喷射混凝土,罐壁采用 150 mm 厚喷射混凝土。按上述参数计算,罐室安全系数为 3.48,满足设计要求。喷射混凝土最终设计参数详见表 4,锚杆最终设计参数详见表 5。

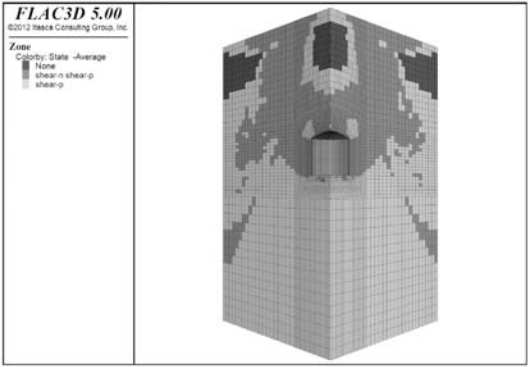


图 20 $k_s = 3.48$ 时整体塑性区云图

Fig. 20 Plastic zone nephogram at $k_s = 3.48$

表4 喷射混凝土最终设计参数

Table 4 Final design parameters of shotcrete

围岩	喷射混凝土 标号	罐壁 喷层厚度 /mm	罐帽 喷层厚度 /mm	拱顶径向 钢筋直径 /mm
Ⅱ	C30	150	200	φ14
Ⅲ	C30	200	250	—

表5 罐室拱顶锚杆最终设计参数

Table 5 Final design parameters of the vaulted anchor of underground oil tank

围岩	锚杆直径 /mm	锚杆间距 /m	锚杆排距 /m	锚杆长度 /m
Ⅱ	φ22	2.0	2.0	3.5
Ⅲ	φ22	1.5	1.5	3.5

3 结论

(1) 提出了地下成品油库拱顶圆筒锚喷支护罐室结构形式,由于围岩与结构受力良好,不仅可以降低工程费用,减少施工作业,提升施工速度,而且能降低工程风险,具有良好应用前景。

(2) 考虑到拱顶圆筒结构具有剪切破坏和环向受拉破坏,应用有限元极限分析法求出了Ⅱ、Ⅲ级围岩拱顶圆筒罐室的剪切破坏安全系数和环向受拉破坏安全系数,表明在Ⅱ、Ⅲ级围岩条件下采用锚喷支护结构形式比现用离壁式钢筋混凝土结构更为安全可靠、经济合理。

参考文献(References)

[1] 郑颖人,朱合华,方正昌,等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论[M]. 北京:人民交通出版社,2012. (Zheng Yingren, Zhu Hehua, Fang Zhengchang, et al. The stability analysis and design theory of surrou-nding rock of undergrounding engineering[M]. Beijing: China Communications Press,2012.(in Chinese))

[2] 郑颖人,孔亮. 岩土塑性力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010. (Zheng Yingren, Kong Liang. Geotechnical plastic mechanis [M]. Beijing: China Architecture and Building Press,2010.(in Chinese))

[3] 郑宏,李春光,李焯芬,等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报,2002,24(5): 626-628. (Zheng Hong, Li Chunguang, Lee Chaofen, et al. Finite

element method for solving the factor of safety [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (5): 626-628.(in Chinese))

[4] 张黎明,郑颖人,王在泉,等. 有限元强度折减法在公路隧道中的应用探讨[J]. 岩土力学,2007,28(1): 97-101. (Zhang Liming, Zheng Yingren, Wang Zaiquan, et al. Application of strength reduction finite element method to road tunnels [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(1): 97-101.(in Chinese))

[5] 郑颖人,邱陈瑜,张红,等. 关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J]. 岩石力学与工程学报,2008, 27(10): 1968-1980. (Zheng Yingren, Qiu Chenyu, Zhang Hong, et al. Exploration of stability analysis methods for surrounding rocks of soil tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(10): 1968-1980.(in Chinese))

[6] 肖强,郑颖人,冯夏庭. 有衬砌隧道设计计算探讨[J]. 地下空间与工程学报,2012, 8(2): 259-267. (Xiao Qiang, Zheng Yingren, Feng Xiating. Study on lined tunnel design methods [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2012, 8(2): 259-267.(in Chinese))

[7] 康宁,金明清,阮亦根,等. 岩石开挖地下立式油罐的设计与施工[J]. 石油工程建设,1995(3): 29-35. (Kang Ning, Jin Mingqing, Ruan Yigen, et al. Design and construction of underground vertical oil tank for rock excavation [J]. Petroleum Engineering Construction, 1995(3): 29-35.(in Chinese))

[8] 康宁,金明清,阮亦根,等. 地下立式油罐的设计和施工[J]. 地下空间,1995, 15(3): 181-191. (Kang Ning, Jin Mingqing, Ruan Yigen, et al. Design and construction of underground vertical oil tank [J]. Underground Space, 1995, 15(3): 181-191. (in Chinese))

[9] 郑颖人,赵尚毅,宋雅坤. 有限元强度折减法研究进展[J]. 后勤工程学院学报,2005,21(3): 1-6. (Zheng Yingren, Zhao Shangyi, Song Yakun. Advance of study on the strength reduction finite element method [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2005, 21 (3): 1-6.(in Chinese))

[10] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学,2005,26(2): 332-336. (Zhao Shangyi, Zheng Yingren, Zhang Yufang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(2): 332-336.(in Chinese))