

压缩空气储能电站地下内衬储气洞室群 上覆岩体稳定性分析方法

曹校勇^{1,2}, 关少钰², 叶欣欣²

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要: 压缩空气储能洞室的埋深问题影响前期选址及整体稳定性评价, 是人工储气洞室设计的关键环节。为研究压缩空气储能电站地下储气洞室群的抗抬破坏模式, 基于单洞极限平衡法提出了考虑岩体摩擦力、黏聚力及临近洞室影响的群洞锥体破坏模型。引入等效滑移面与等效滑移面倾角 ω 参数, 通过中间块体与边侧块体作用力 E_a 相等建立控制方程求解等效滑移面倾角 ω , 从而推导安全埋深。研究表明: 考虑临近洞室影响的群洞模型埋深计算结果相较单洞模型略有增加, 群洞模型更接近实际受力, 计算更加合理。为研究群洞模型对设计参数的响应特性, 系统分析了黏聚力、地应力侧压系数、洞径以及洞室间距对埋深的影响, 分析结果表明: 埋深与黏聚力呈负相关, 与地应力侧压系数呈正相关; 埋深随洞径的增大而增大, 但小洞径的群洞效应更显著; 埋深随相邻洞室间距的增大而减小, 对于常规压缩空气储能洞室(洞径范围 8~15 m), 当相邻洞室间距大于 4 倍洞径时, 群洞效应可忽略不计。

关 键 词: 地下工程; 压缩空气储能; 极限平衡; 群洞模型; 安全埋深

中图分类号: TU 93

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2026) 02-530-09

Stability analysis method for underground lined storage cavern group in compressed air energy storage power station

CAO Xiao-yong^{1,2}, GUAN Shao-yu², YE Xin-xin²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China;

2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: The burial depth issue of compressed air energy storage(CAES) caverns significantly influences initial site selection and overall stability assessment, serving as a critical aspect in the design of artificial gas storage caverns. To investigate the uplift failure mode of tunnel-type gas storage reservoirs for CAES, we propose a multi-cavern conical failure model based on the single-cavern limit equilibrium framework. The model accounts for rock-mass friction and cohesion, as well as interactions between adjacent caverns. We introduce parameters describing the equivalent slip surface and its inclination angle ω . By enforcing equality of the inter-block force (E_a) between the central and lateral blocks, we derive a governing equation for ω . Solving this equation yields the safe burial depth. Research findings demonstrate that the calculation results of multi-cavern model, which considers the influence of adjacent caverns, are more reasonable compared to those of the single-cavern model. To further explore the response characteristics of the multi-cavern model to design parameters, we conduct a systematic analysis of the impacts of cohesion, horizontal in-situ stress coefficient, cavern diameter, and cavern spacing on buried depth. The results indicate that burial depth is negatively correlated with cohesion and decreases as cohesion increases. In contrast, burial depth is positively correlated with the horizontal in-situ stress coefficient and increases as this coefficient rises. Burial depth also increases with cavern diameter but decreases as the spacing between adjacent caverns increases. Notably, when the spacing between adjacent caverns exceeds four times the cavern diameter, the multi-cavern effect can be neglected.

Keywords: underground construction; compressed air energy storage; limit equilibrium; multi-cavern model; safe burial depth

收稿日期: 2025-07-30

录用日期: 2025-10-15

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (No. 2025CY-YBXM-499)。

This work was supported by the Key R&D Program of Shaanxi Province (2025CY-YBXM-499).

第一作者简介: 曹校勇, 男, 1976 年生, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事隧道与地下工程及压缩空气储能相关科研工作。E-mail: 306534066@qq.com

通信作者: 关少钰, 女, 1995 年生, 硕士, 工程师, 主要从事隧道结构与压缩空气储能研究。E-mail: 1102687298@qq.com

1 引言

近年来,在国家推行“双碳”目标的背景下,以风能、太阳能为代表的可再生能源得到了快速发展。可再生能源发电的波动性和间歇性导致其在发电量和发电时间上存在不确定性,发电和用电之间存在不匹配性,使富余的电能无法储存和消纳,出现大量弃风弃电现象,因而发展长时大容量储能技术意义重大。

典型大规模长时间储能技术中,压缩空气储能具有容量大、安全性高、寿命长、经济环保、建设周期短、受地理位置限制小等优势,因而具有广阔发展前景。大型储气库建设主要采用人工盐穴、地面储罐以及岩层人工储气洞室。天然盐穴中人造腔室成本相对较低,但盐穴分布较少,杂质较多,会引起盐穴造腔形态不一问题。地面储罐目前多以复合材料以及钢罐为主,大量储罐的建设费用和储气成本较高。因此,目前在建以及规划备案的压缩空气储能项目多采用隧洞式人工储气洞室。

合理的埋深可保证上覆岩土体在洞内高压作用下的抗抬稳定性,同时可降低工程投资、提高项目收益率。人工储气洞室的埋深计算以及抗抬问题研究,大多参考水工压力隧道相关研究理论执行。1970年挪威学者依据工程实践提出了挪威准则^[1],其原理是要求压力隧洞洞身部位上覆岩体重量不小于作用于洞身围岩面积上的垂直上抬压力,依据其破坏面形态可将抗抬破坏模型分为垂直破坏模型、锥体破坏模型和对数螺旋破坏模型等。

国内外学者针对压力洞室的抗抬问题做了大量研究^[2-10],Kim等^[11]采用垂直破坏模型探讨了压力洞室设计参数对地面隆起安全性的影响,给出储气压力、洞室尺寸、覆盖层深度、原位应力状态、岩石黏聚力和内摩擦角等参数敏感性分析结果。Kim^[12]采用 Hoek-Brown 强度准则对垂直破坏面上的摩擦阻力进行估计,对挪威准则进行修正,该方法可以同时考虑岩石的完整强度和岩体条件。Tunsakul等^[13]基于无网格伽辽金法建立大罐式高压储气库岩体破坏路径,根据建立的破坏路径采用极限分析法对洞室上方围岩稳定性进行评价,结果表明该方法相较现有的垂直破坏模型及刚性圆锥模型更具合理性。徐英俊等^[14]基于上限定理并假定岩体服从相关联的 Hoek-Brown 准则,推导洞室隆起破坏函数和极限内压。王者超等^[15]采用极限平衡方法和弹塑性分析方法推导隧洞式内衬岩洞上限压力 and 下限压力解析解。孙冠华等^[16]建立了考虑破裂面摩擦

和黏聚作用的锥体破坏模型,基于极限平衡法推导埋深与安全系数、破裂角间的控制方程,并开发计算软件采用初值迭代法求解埋深。

在高内压作用下洞室周围发育的裂缝可以逐渐延伸到上部地表,最终导致隆起失效,因此,高内压下洞室围岩裂缝扩展规律的研究也是抗抬稳定性研究中较为重要的课题。Tunsakul等^[17]基于无网格伽辽金法和内聚裂纹模型提出了一种数值模拟方法,用于模拟高内压作用下隧道围岩的裂隙扩展模式,并结合圆形洞室模型试验对数值模拟结果进行验证。Jongpradist等^[18]通过模型试验对比分析了隧道式压力洞室和大罐式压力洞室的裂缝扩展模式,主要对比分析原位应力比参数对围岩起裂点、裂缝倾角、裂缝长度及极限内压的影响。

以上所有隧洞式储气库研究均未考虑平面布置方案中洞室间距的影响,当洞室间距较小或在高水平地应力区域,相邻洞室上覆围岩中的应力干扰不可忽视^[19]。本文引入孙冠华等^[16]的极限平衡相关理论,考虑群洞影响对交汇区破裂面进行冲切修正,从而建立群洞锥体破坏模型;基于单洞破坏模型平衡方程,通过迭代计算求解起裂角和破裂角参数,再代入群洞平衡方程从而推导不同间距下群洞模型合理埋深。该方法可用于判定群洞影响区域、修正单洞计算埋深、评估平面布置方案合理性,对隧洞式储气库埋深设计和稳定性评价具有重要工程意义。

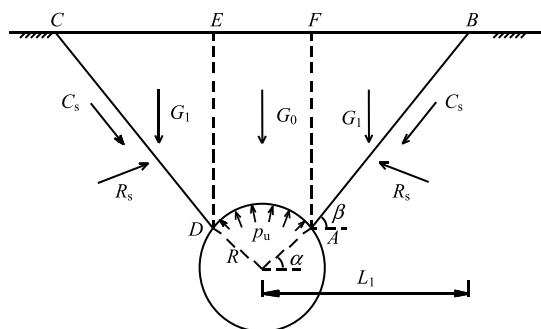
2 埋深计算模型

2.1 单洞计算模型

孙冠华等^[16]通过考虑破坏面上的黏聚力和内摩擦角对刚性圆锥模型进行了优化,计算模型如图1所示。该模型将洞室上方围岩划分为3个块体,取右侧三角形块体和中间块体分别建立平衡关系,通过接触面上主动力 E_a 建立块体间联系,推导出埋深 H 和安全系数 F_s 的控制方程如下:

$$f(H, F_s) = \frac{(G_1 - C) \sin(\varphi_s + \beta) + C_s \cos \varphi_s}{\cos(\varphi_s + \beta - \phi)} - \frac{P - G_0 - 2C}{2 \sin \phi} = 0 \quad (1)$$

式中: G_1 为梯形块体重力; G_0 为中间块体重力; C_s 为梯形块体斜向破裂面黏聚力; C 为中间块体破裂面黏聚力 (kN/m); P 为储气内压的合力 (kN/m); ϕ 为非破裂面摩擦角 (°); φ_s 为折减后的内摩擦角 (°); β 为破裂角 (°)。



注: R_s 为梯形块体斜向破裂面摩擦力; p_u 为储气洞室内压; α 为起裂角; R 为洞室半径; L_1 为单洞模型极限边界长度。

图 1 单洞锥体破坏模型
Fig.1 Single-cavern conical failure model

通过上述埋深控制方程可以得到在指定安全系数下所对应的埋深,可确定在单洞锥体破坏模式下洞室的起裂角 α 和破裂角 β 。单洞模型极限边界 L_1 可以表示为

$$L_1 = \frac{H + R - R \sin \alpha}{\tan \beta} + R \cos \alpha \quad (2)$$

2.2 群洞计算模型

隧洞式储气库平面布置方案需结合地质地形条件、施工工期及施工方案等因素综合确定,通过布设多条平行回形储气单元形成地下储气区域。图 2 为国内某拟建圆形隧洞式储气库地下方案示意图,垂直洞室走向截取横断面可得到如图 3 所示的群洞布置示意图。图中, L 为相邻洞室中心距, L_0 为起裂点处埋深。

由图 3 可知,当相邻洞室间距较小时,会在直线 $GT(JU)$ 高度内形成应力叠加区,为了简化叠加区域内的作用效果,将该区域破坏边界简化为垂直冲切型得到如图 4 所示的群洞锥体破坏模型。



图 2 隧洞式储气库地下方案示意图
Fig.2 Underground layout of the tunnel-type gas storage

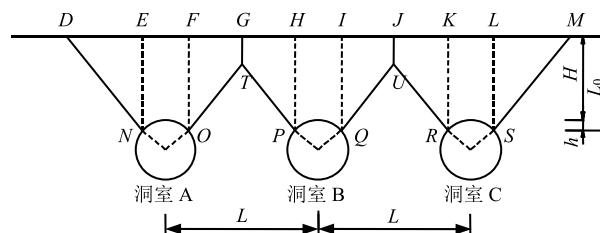
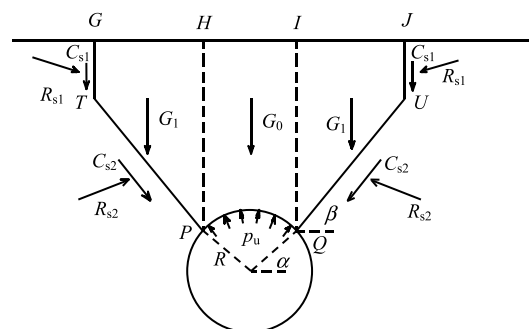


图 3 群洞布置示意图
Fig.3 Arrangement of multi-cavern



注: C_{s1} 为梯形块体冲切破裂面黏聚力; R_{s1} 为梯形块体冲切破裂面摩擦力; C_{s2} 为梯形块体扩展破裂面黏聚力; R_{s2} 为梯形块体扩展破裂面摩擦力。

图 4 群洞锥体破坏模型
Fig.4 Multi-cavern conical failure model

群洞锥体破坏模型假定破坏面由垂直冲切段和斜向剪切段组合形成,破坏面上受到黏聚力 C_s 和摩擦力 R_s ,洞室上方对称土体从左至右依次划分为块体 $GTPH$ 、块体 $HPQI$ 和块体 $IQUJ$,选取右侧梯形块体 $IQUJ$ 进行受力分析如图 5 所示。该块体主要受到重力、各破坏面上的黏聚力和摩擦力,其中黏聚力大小与滑移段长度呈正相关,重力可通过梯形块体面积求解,破坏面上的法向力(E_a 、 R_{s1} 、 R_{s2})无法直接求解,为了简化未知量的数量,基于力的矢量多边形法则引入等效滑移面对原破坏面受力进行等效,如图 6 所示。

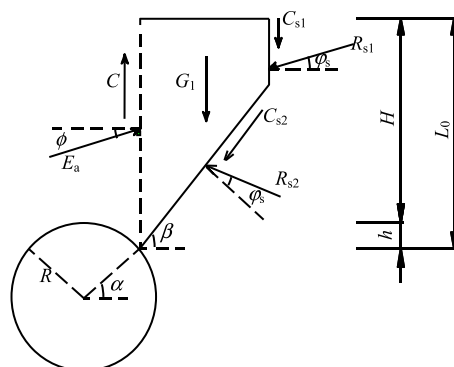
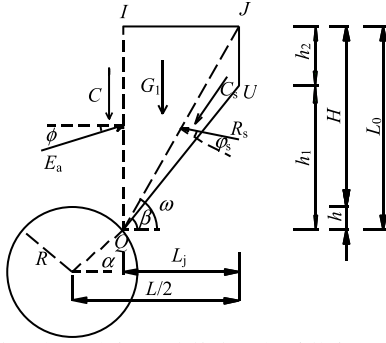


图 5 右侧梯形块体受力分析
Fig.5 Force analysis of the right trapezoidal block



注：\$C_s\$ 为等效破裂面黏聚力；\$R_s\$ 为等效破裂面摩擦角；\$\omega\$ 为等效滑移面倾角；\$L_j\$ 为起裂点至地面破裂边界水平距离。

图6 右侧梯形块体等效滑移面受力分析

Fig.6 Equivalent slip plane force analysis of right trapezoidal block

图6中的梯形块体满足受力平衡，将各个力依次首尾相接可得到如图7所示的矢量多边形。

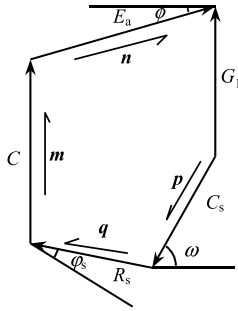


图7 右侧梯形块体闭合矢量多边形

Fig.7 Closed vector polygon of right trapezoidal block

根据力的矢量多边形准则，右侧梯形块体平衡方程为

$$Cm + E_a n + G_1(-m) + C_s p + R_s q = 0 \quad (3)$$

式中：\$m\$、\$n\$、\$p\$、\$q\$ 均为单位向量，将力分别在竖直和水平方向投影，可以得到力在水平和竖直方向上的平衡方程分别为

$$E_a \cos \phi - C_s \cos \omega - R_s \sin(\phi_s + \omega) = 0 \quad (4)$$

$$C + E_a \sin \phi - G_1 - C_s \sin \omega + R_s \cos(\phi_s + \omega) = 0 \quad (5)$$

其中，

$$\left. \begin{aligned} C &= c_e L_0 \\ C_s &= \frac{c_s L_j}{\cos \omega} = \frac{c_e L_j}{F_s \cos \omega} \\ G_1 &= \gamma \left(\frac{L_0 L_j}{2} + \frac{L_j (L_0 - L_j \tan \beta)}{2} \right) \\ &\quad \gamma \left(L_0 L_j - \frac{L_j^2 \tan \beta}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\phi_s = \arctan \left(\frac{\tan \phi}{F_s} \right) \quad (7)$$

$$\phi = \lambda \phi \quad (8)$$

$$L_j = L/2 - R \cos \alpha \quad (9)$$

$$L_0 = L_j \tan \omega \quad (10)$$

式中：\$c_e\$ 为岩体黏聚力 (kPa)；\$c_s\$ 为折减后的岩体黏聚力 (kPa)；\$\gamma\$ 为岩体重度 (kN/m³)；\$\phi\$ 为围岩内摩擦角；\$\lambda\$ 为非破裂面与假定破裂面摩擦角关系，无实测值时建议可按《水工隧洞设计规范》(SL 279—2016) [20] 相关规定进行取值。

联立式 (4)、(5) 消掉 \$R_s\$ 可得

$$E_a = \frac{(G_1 - C) \sin(\phi_s + \omega) + C_s \cos \phi_s}{\cos(\phi_s + \omega - \phi)} \quad (11)$$

中间块体的受力示意图如图8所示，该块体主要受到重力 \$G_0\$、黏聚力 \$C\$，两侧梯形块体作用力 \$E_a\$ 以及储气洞室内压 \$p_u\$。将力投影到竖直方向可得到力在竖直方向上的平衡方程为

$$2E_a \sin \phi + G_0 + 2C = P \quad (12)$$

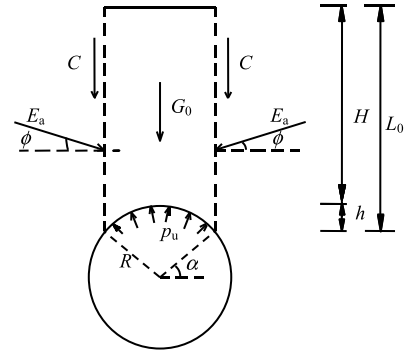


图8 中间块体受力分析

Fig.8 Force analysis of the middle block

求解可得到主动力 \$E_a\$ 为

$$E_a = \frac{P - G_0 - 2C}{2 \sin \phi} \quad (13)$$

其中储气内压的合力 \$P\$ 以及块体自重 \$G_0\$ 可通过式 (14)、(15) 求解。

$$P = \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} R p_u \sin \theta d\theta = 2R p_u \cos \alpha \quad (14)$$

$$G_0 = \gamma \left[2R \cos \alpha (L_0 + R \sin \alpha) - \frac{1}{2} R^2 \sin 2\alpha - \frac{1}{2} R^2 (\pi - 2\alpha) \right] \quad (15)$$

式中：\$\theta\$ 为储气库上覆抗抬围岩圆心角。

联立式 (11)、(13) 可得

$$E_a = \frac{(G_1 - C) \sin(\varphi_s + \omega) + C_s \cos \varphi_s}{\cos(\varphi_s + \omega - \phi)} = \frac{P - G_0 - 2C}{2 \sin \phi} \quad (16)$$

从而建立埋深 H 与等效滑移面倾角 ω 之间的控

$$f(H, F_s) = \frac{(G_1 - C) \sin(\varphi_s + \omega) + C_s \cos \varphi_s}{\cos(\varphi_s + \omega - \phi)} - \frac{P - G_0 - 2C}{2 \sin \phi} =$$

$$\left[\gamma \left(L_0 L_j - \frac{L_j^2 \tan \beta}{2} \right) - c_e L_0 \right] \frac{\sin(\varphi_s + \omega)}{\cos(\varphi_s + \omega - \phi)} + \frac{c_e L_j \cos \varphi_s}{F_s \cos \omega \cos(\varphi_s + \omega - \phi)} -$$

$$\frac{2R p_u \cos \alpha - \gamma \left[2R \cos \alpha (L_0 + R \sin \alpha) - \frac{1}{2} R^2 \sin 2\alpha - \frac{1}{2} R^2 (\pi - 2\alpha) \right] - 2c_e L_0}{2 \sin \phi} = 0 \quad (18)$$

式 (18) 中起裂角 α 与地应力侧压系数 k 相关, 可参考文献^[13]中的无网格伽辽金 (element free Galerkin, 简称 EFG) 法数值解进行取值, 破裂角 β 可由单洞模型确定, 因此式 (18) 中变量唯一 (等效滑移面倾角 ω) 可解, 从而群洞模型修正下的安全埋深可表示为

$$H = \tan \omega L_j - R + R \sin \alpha \quad (19)$$

2.3 求解思路

图 9 为储气洞室埋深求解流程, 先将设计参数代入单洞锥体破坏模型确定破裂角 β 和单洞模型影响边界 L_1 , 判断相邻洞室间距 L 与 L_1 的大小关系, 若 $L/2 - L_1 \geq 0$ 则选用单洞模型求解埋深, 反之则代入群洞模型求解埋深。

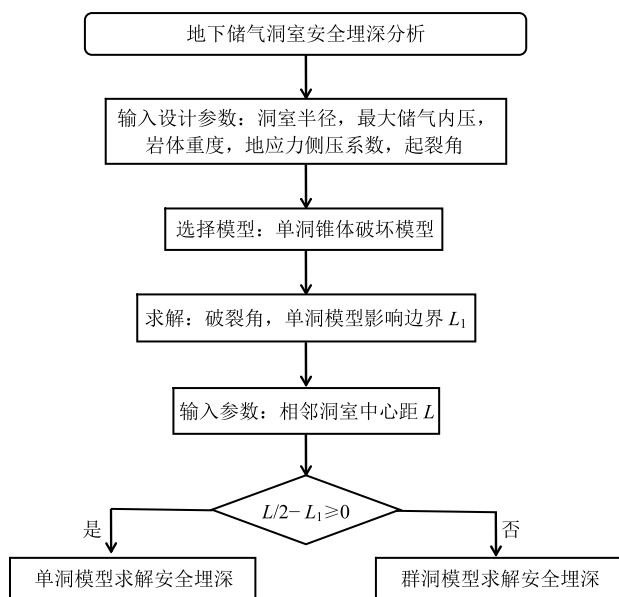


图 9 地下储气洞室埋深求解流程图

Fig.9 Depth solution flowchart for compressed air energy storage cavern

制方程:

$$f(H, F_s) = \frac{(G_1 - C) \sin(\varphi_s + \omega) + C_s \cos \varphi_s}{\cos(\varphi_s + \omega - \phi)} - \frac{P - G_0 - 2C}{2 \sin \phi} = 0 \quad (17)$$

将式 (6)、(14)、(15) 代入式 (17), 可得

3 工程算例

国内某压缩空气储能调峰电站项目一期总装机容量为功率 700 MW、发电量 3 500 MW · h, 项目采用压缩空气储能技术路线, 储气库采用新开挖地下人工洞室, 设计容积为 87.5 万 m³, 设计洞径为 12 m, 最大储气压力为 10.1 MPa。拟建区域主要为中奥陶系马家沟组, 岩性主要为灰岩, 围岩类别为 III 类, 围岩物理力学指标建议值按照表 1 选取。

根据起裂角计算公式, 将地应力侧压系数 1.3 代入可得本算例起裂角为 38.25°。安全系数取 3, 由单洞极限平衡模型得到计算埋深为 73.8 m, 破裂角为 80.8°, 代入式 (2) 可以得到单洞模型影响边界为 16.95 m。由群洞模型判据条件可知, 当相邻洞室中心距小于 33.9 m (约 2.83 倍洞室直径) 时, 应考虑群洞影响, 取洞室中心距为 24 m (2 倍洞室直径) 可以得到群洞模型计算埋深为 105.3 m。由计算结果可知, 当洞室间距较小时群洞效应显著, 应采用更符合工程实际受力的群洞锥体破坏模型。

表 1 围岩物理力学指标建议值
Table 1 Suggested values of physical and mechanical indexes of surrounding rock

围岩 类别	重度 γ / (kN · m ⁻³)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 ϕ / (°)	地应力系数 k
III	24	1 200	28.8	1.3

4 参数分析

埋深计算结果主要受到洞径、黏聚力、地应力侧压系数以及洞室间距等因素的影响, 为了研究埋深的关键控制参数, 对比群洞锥体破坏模型的应用效果, 采用工程算例中的岩土参数通过控制变量法

进行影响分析。

4.1 黏聚力对埋深的影响分析

以黏聚力作为唯一变量研究其在 0.1~2 MPa 区间内对埋深的影响,结果如图 10 所示。随着黏聚力的增大,岩体抗抬力的主要贡献逐步由上覆土体重力转变为岩体滑移面间的黏聚力,因此埋深与黏聚力宏观趋势表现为负相关。其中在 0.8~1 MPa 区间内,埋深随黏聚力的增大而增大,主要是由于在该范围内岩体的重力较黏聚力仍发挥主要作用,该范围内破裂角随黏聚力增大逐步增大,减小了上覆土体单位面积,从而需要更大的埋深来抵抗内压。由图可知,0~1 MPa 为重力抗抬主导区,大于 1 MPa 后则为黏聚力抗抬主导区。

图 10 中单洞模型结果和群洞模型结果趋势一致,且群洞模型计算埋深均大于单洞模型计算埋深,表明在间距为 2 倍洞径条件下群洞模型计算结果更符合工程实际。

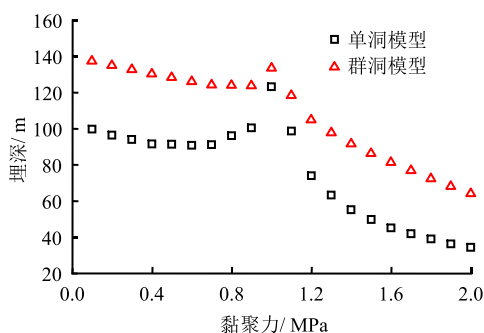


图 10 不同黏聚力条件下单洞、群洞模型埋深结果对比
Fig.10 Comparison of burial depths of single-cavern and multi-cavern models under different cohesions

4.2 地应力侧压系数对埋深的影响分析

以地应力侧压系数作为唯一变量,研究 k 在 0.5~3 区间内对埋深的影响,结果如图 11 所示。随着地应力侧压系数的增大,单洞模型和群洞模型计算埋深均有所增大,但具体的响应敏感度有所不同。单洞模型在 $k=0.5\sim1$ 区间最为敏感,该段曲线斜率最大;在 $k=1\sim2.5$ 区间时单洞埋深斜率变缓;当 $k>2.5$ 后,单洞模型埋深不再随地应力侧压系数而变化,逐步趋于稳定。

当 $k<0.8$ 时,已超出群洞模型影响界限,应采用单洞模型计算埋深,因此群洞模型地应力侧压系数研究区间限定为 0.8~3。由图 11 可知,群洞模型对地应力侧压系数的响应较单洞模型更灵敏,群洞模型图示斜率均大于单洞模型,该特点也导致群

洞模型和单洞模型计算结果差值随地应力侧压系数增大而增大,当地应力侧压系数大于 2.5 后,群洞模型埋深和单洞模型计算埋深差值趋于稳定。

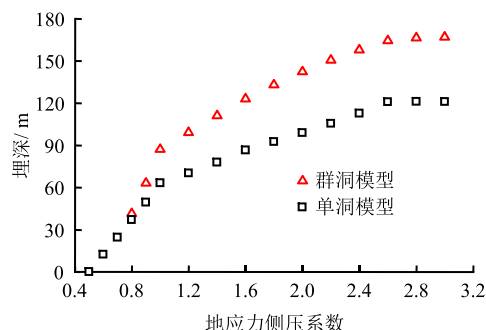


图 11 不同地应力侧压系数下单洞、群洞模型埋深对比图
Fig.11 Comparison of burial depths of single-cavern and multi-cavern models under different horizontal in-situ stress coefficients

4.3 洞径对埋深的影响分析

为研究洞径大小对埋深的影响,取洞径变化范围 8~16 m,分别采用单洞模型和群洞模型计算埋深,其中群洞模型中相邻洞室间距取 2 倍洞室直径 ($2D$),对比结果如图 12 所示。由图可知,埋深随洞径增大而增大,二者呈正相关。群洞模型计算埋深均大于单洞计算结果,表明在间距为 2 倍洞径条件下群洞的影响不可忽视。

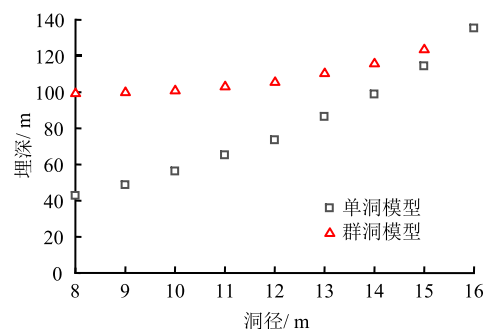


图 12 不同洞径条件下单洞、群洞模型埋深结果对比
Fig.12 Comparison of burial depths of single-cavern and multi-cavern models under different cavern diameters

随洞径增大,群洞计算结果与单洞计算结果的差异逐渐减小,表明在小洞径条件下对群洞模型的敏感性更高。为进一步探究群洞模型对洞径参数的敏感特性,以洞径范围 2~20 m 为研究对象,在图 13 中对比分析了黏聚力区间为 1.2~2.0 MPa 时,群洞影响区与洞径比值这一无量纲量随洞径的变化关

系。其中群洞影响区的定义为采用群洞模型时所允许的洞室最大间距 ($L/2 < L_1$)。无量纲群洞影响区指的是用洞室直径对群洞影响区进行归一化处理得到的无量纲量。由图 13 可知, 在不同黏聚力条件下, 无量纲群洞影响区随洞径的变化趋势一致, 均呈现随洞径增大而减小的趋势, 但曲线斜率存在显著差异。这表明, 随着黏聚力的增大, 无量纲群洞影响区随洞径变化的变幅逐渐减小。图中最大无量纲群洞影响区位于左上方, 约为 5.6; 最小无量纲群洞影响区位于右下角, 约为 1.7。因此, 在小黏聚力、小洞径条件下群洞效应最为显著。

对于压缩空气储能洞室, 其直径多大于 8 m。对比图 13 中的多条曲线, 可得出当临近洞室间距大于 $4D$ 时群洞效应可忽略不计, 此时无须再考虑洞室间的应力叠加及开挖扰动等不利影响。在某些特定工程中, 若采用小直径压力管道(直径小于 2 m)进行平行铺设, 则应对管道间距进行安全性评估, 以防止在群洞效应作用下, 上覆土体发生抗抬失稳现象。

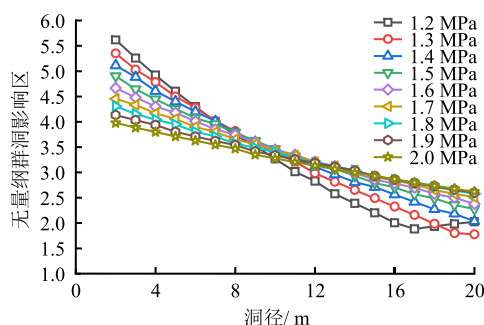


图 13 群洞影响区与洞径关系曲线
Fig.13 Relationship between multi-cavern affected area and cavern diameter

4.4 洞室间距对埋深的影响分析

洞室间距作为群洞模型的关键参数, 对埋深计算结果具有显著影响。为深入探究不同洞室间距条件下群洞埋深的变化规律, 图 14 以洞室间距作为唯一变量, 对比分析了群洞模型影响区内不同洞径条件下洞室间距对埋深的影响。计算结果表明, 在群洞影响范围内埋深随洞室间距的增大呈递减趋势。具体而言, 当洞室间距较小时, 群洞模型的求解结果无限趋近于垂直破坏模型; 而当洞室间距增大至群洞模型边界时, 群洞埋深结果逐渐趋近于单洞埋深结果。

为消除洞径差异对分析结果的影响, 从而获得更具普遍性的规律, 用洞室直径对洞室间距进行归一

化处理得到无量纲量, 进而绘制无量纲洞室间距与埋深的关系曲线, 如图 15 所示。分析显示, 在不同洞径条件下, 无量纲洞室间距与埋深的关系曲线呈现出一致的趋势, 且重合度较高, 表明该规律具有广泛的适用性, 不受洞径大小的限制。进一步分析发现, 小洞径条件下群洞模型的影响范围更为广泛, 而随着洞径的增大, 群洞影响区逐渐缩小, 这一结论与洞径影响的分析结果吻合。

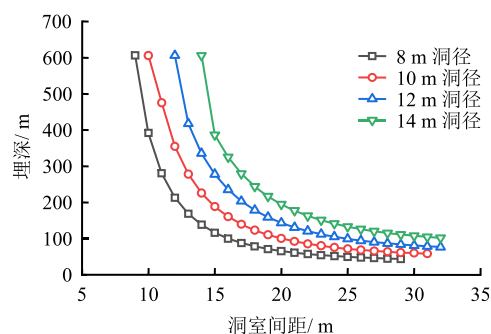


图 14 洞室间距与群洞埋深关系曲线
Fig.14 Relationship between cavern distance and burial depth

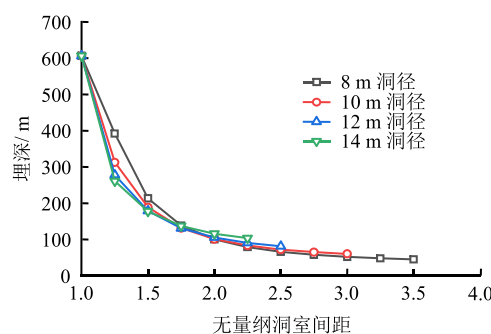


图 15 无量纲洞室间距与群洞埋深关系曲线
Fig.15 Relationship between dimensionless cavern spacing and burial depth

综上所述, 当洞室间距较小时, 群洞效应显著, 此时采用群洞模型进行埋深计算能够获得更为合理可靠的结果。

5 结 论

本文基于现有极限平衡锥体模型提出一种考虑群洞影响的群洞锥体模型, 该模型可考虑洞室平面布置间距的相互影响, 通过对洞室间距 L 与单洞模型极限边界 L_1 的关系进行判断, 从而独立选择单洞或群洞计算模型, 该群洞模型弥补了原单洞模型小净距不适用等问题, 为局部小净距处的埋深计算提供了新理论, 通过对模型参数分析得出如下主要

结论:

(1) 基于极限平衡法和被动土压力理论, 引入假定破裂面对群洞模型进行简化, 从而建立埋深 H 与等效滑移面倾角 ω 之间的控制方程; 群洞模型与单洞模型可依据洞室间距 L 与单洞模型极限边界 L_1 间的关系判定进行选取。

(2) 在群洞影响范围内, 埋深随洞室间距的增大而减小, 当洞室间距较小时, 群洞模型无限接近于垂直破坏模型; 当洞室间距增大至群洞模型边界处时群洞埋深结果逐步趋近于单洞埋深结果。群洞模型的无量纲群洞影响区与洞径关联较大, 二者呈负相关, 在小黏聚力、小洞径条件下的群洞效应最显著, 总体而言, 常规压气储能洞室(洞径范围 8~15 m) 相邻洞室间距大于 $4D$ 时可忽略群洞效应。

(3) 群洞模型埋深对黏聚力和地应力侧压系数的响应与单洞模型类似, 表现为随黏聚力的增大而减小, 随地应力侧压系数的增大而增大。但群洞模型对地应力侧压系数的敏感性较单洞模型更敏锐, 同时群洞模型埋深计算结果均大于单洞结果(以 $2D$ 洞室间距为例), 表明当洞室间距较小处于群洞影响范围区时, 应按本文建议采用群洞模型。

参考文献

- [1] BREKKE T L, RIPLEY B D. Design guidelines for pressure tunnels and shafts (No. EPRI-AP-5273)[R]. Berkeley: University of California at Berkeley, 1987.
- [2] 夏才初, 张平阳, 周舒威, 等. 大规模压气储能洞室稳定性和洞周应变分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1391-1398.
XIA Cai-chu, ZHANG Ping-yang, ZHOU Shu-wei, et al. Stability and tangential strain analysis of large-scale compressed air energy storage cavern[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1391-1398.
- [3] JIANG Z M, LI P, TANG D, et al. Experimental and numerical investigations of small-scale lined rock cavern at shallow depth for compressed air energy storage[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2020, 53: 2671-2683.
- [4] BASNET B C, PANTHI K K. Analysis of unlined pressure shafts and tunnels of selected Norwegian hydropower projects[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2018, 10(3): 486-512.
- [5] 孙冠华, 易琪, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站大罐式地下内衬洞库上覆岩体稳定性分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2024, 54(12): 2377-2391.
- [6] 孙冠华, 王娇, 于显杨, 等. 压缩空气储能电站地下内衬洞库基本原理与分析方法研究进展[J]. 岩土力学, 2025, 46(1): 1-25.
SUN Guan-hua, WANG Jiao, YU Xian-yang, et al. Research progress on basic principles and analysis methods of lined rock caverns for compressed air energy storage station[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2025, 46(1): 1-25.
- [7] 易琪, 孙冠华, 姚院峰, 等. 压缩空气储能地下内衬洞库上覆岩体稳定性分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3523-3532.
YI Qi, SUN Guan-hua, YAO Yuan-feng, et al. Stability analysis of overlying rock mass of lined rock caverns for compressed air energy storage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(12): 3523-3532.
- [8] GENG X, SUN G H, YU X Y, et al. Reliability design of compressed air energy storage in lined rock caverns: a study based on rock mass failure modes[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2025, 165: 106840.
- [9] 孙冠华, 易琪, 姚院峰, 等. 压缩空气储能电站隧道式地下洞库潜在失稳模式研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(1): 41-49.
SUN Guan-hua, YI Qi, YAO Yuan-feng, et al. Study on the potential instability patterns of tunnel type underground caverns for compressed air energy storage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(1): 41-49.
- [10] 蒋中明, 刘宇婷, 陆希, 等. 压气储能内衬洞室储气关键问题与设计要点评述[J]. 岩土力学, 2024, 45(12): 3491-3509.
JIANG Zhong-ming, LIU Yu-ting, LU Xi, et al. Review on key scientific and design issues of lined rock caverns for compressed air energy storage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(12): 3491-3509.
- [11] KIM H M, PARK D, RYU D W, et al. Parametric sensitivity analysis of ground uplift above pressurized underground rock caverns[J]. **Engineering Geology**, 2012, 135-136: 60-65.
- [12] KIM H M. Stability analysis for ground uplift in underground storage caverns for high pressurized gas using Hoek-Brown strength criterion and geological

- strength index (GSI)[J]. **Tunnel and Underground Space**, 2014, 24(4): 289-296.
- [13] TUNSAKUL J, JONGPRADIST P, SOPARAT P, et al. Analysis of fracture propagation in a rock mass surrounding a tunnel under high internal pressure by the element-free Galerkin method[J]. **Computers and Geotechnics**, 2014, 55: 78-90.
- [14] 徐英俊, 夏才初, 周舒威, 等. 基于极限分析上限定理的压气储能洞室抗隆起破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(10): 1971-1980.
- XU Ying-jun, XIA Cai-chu, ZHOU Shu-wei, et al. Anti-uplift failure criterion of caverns for compressed air energy storage based on the upper bound theorem of limit analysis[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2022, 41(10): 1971-1980.
- [15] 王者超, 贾文杰, 冯夏庭, 等. 隧洞式内衬储气库极限储存压力解析解[J]. 力学学报, 2023, 55(3): 710-718.
- WANG Zhe-chao, JIA Wen-jie, FENG Xia-ting, et al. Analytical solution of limit storage pressures for tunnel type lined gas storage caverns[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2023, 55(3): 710-718.
- [16] 孙冠华, 王章星, 王娇, 等. 压缩空气储能电站地下硐库安全埋深计算的极限平衡方法[J]. 土木工程学报, 2023, 56(增刊 2): 67-77.
- SUN Guan-hua, WANG Zhang-xing, WANG Jiao, et al. Limit equilibrium method for calculating the safe burial depth of underground caverns in compressed air energy storage[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2023, 56 (Suppl.2): 67-77.
- [17] TUNSAKUL J, JONGPRADIST P, KIM H, et al. Evaluation of rock fracture patterns based on the element-free Galerkin method for stability assessment of a highly pressurized gas storage cavern[J]. **Acta Geotechnica**, 2018, 13(4): 817-832.
- [18] JONGPRADIST P, TUNSAKUL J, KONGKITKUL W, et al. High internal pressure induced fracture patterns in rock masses surrounding caverns: experimental study using physical model tests[J]. **Engineering Geology**, 2015, 197: 158-171.
- [19] 王其宽, 张彬, 王汉勋, 等. 内衬式高压储气库群布局参数优化及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2020, 28(5): 1123-1131.
- WANG Qi-kuan, ZHANG Bin, WANG Han-xun, et al. Optimization and stability analysis of layout parameters of lined high-pressure gas storage caverns[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2020, 28(5): 1123-1131.
- [20] 中华人民共和国水利部. SL 279—2016 水工隧洞设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL 279—2016 Specification for design of hydraulic tunnel[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2016.
- 上接第 529 页
- [30] DAMASCENO D R, SPROSS J, JOHANSSON F. Rock mass response for lined rock caverns subjected to high internal gas pressure[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2023, 15(1): 119-129.
- [31] 王者超, 贾文杰, 冯夏庭, 等. 隧洞式内衬储气库极限储存压力解析解[J]. 力学学报, 2023, 55(3): 710-718.
- WANG Zhe-chao, JIA Wen-jie, FENG Xia-ting, et al. Analytical solution of limit storage pressures for tunnel type lined gas storage caverns[J]. **Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics**, 2023, 55(3): 710-718.
- [32] 张国华, 王薪锦, 柯洪, 等. 压气储能地下内衬储气库运行压力区间确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(12): 2874-2891.
- ZHANG Guo-hua, WANG Xin-jin, KE Hong, et al. A method to determine the operating pressure range of lined underground gas storage facility in a compressed air energy storage system[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2024, 43(12): 2874-2891.
- [33] 吴顺平, 李利平, 张晓平. 岩石力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2021.
- WU Shun-ping, LI Li-ping, ZHANG Xiao-ping. Rock mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2021.
- [34] DU J M, SHU Y H, XU G W, et al. Study on the influence of geo-stress field on the fracture pattern of secondary tunnel lining[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2023, 152: 107467.
- [35] YANG R, HE S, WANG J, et al. Statistical and numerical analysis on characteristics and influence factors of construction cracks of large-diameter underwater shield tunnel: a case study[J]. **Frontiers in Earth Science**, 2023, 11: 1235674.