

文章编号: 1004-4051(2024)11-0113-08

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20241920

基于极限平衡法的小窑采空区地基稳定性 评价方法研究

田迎斌¹, 李科心¹, 赵环帅², 易四海³

(1. 中煤科工生态环境科技有限公司, 天津 300450;

2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083;

3. 华北科技学院安全工程学院, 河北 廊坊 065201)

摘要: 在煤矿采空区地表进行城镇建设开发利用已成为国内矿业城市解决建设用地指标不足的有效途径。为了给城镇建设规划提供依据和保证拟建建筑的安全, 首先必须对采空区场地进行地基稳定性评价, 然后根据评价结果有针对性地采取建筑、结构、地基基础及采空区处理等治理措施。其中, 小窑采空区往往因其开采面积小、顶板垮落不充分而成为悬顶区, 悬顶区在地表建筑荷载作用下, 有可能发生突发性的采空塌陷地质灾害, 从而危及地表建筑及人员安全。极限平衡法是小窑采空区地基稳定性评价常用的方法之一, 该方法通过建立采空区顶板压力、建筑基底压力、上覆岩层自重及岩体摩阻力四者之间的平衡方程而得到临界埋藏深度。但对于小窑采空区临界埋藏深度计算公式中基底压力 p 和埋深 H 参数概念的理解尚存在分歧, 从而造成在评价工作中计算结果和评价结论的不唯一。针对该公式存在的问题进行了剖析, 建立了与不同概念理解相对应的两种修正计算模型。研究对比分析后, 建议采用以适用性更强的第二种修正计算模型为准, 并明确了参数 p 和参数 H 的基本概念, 即参数 p 的意义为建筑物基底平均压力, 参数 H 的意义为自建筑物基底起算的采空区埋藏深度。在此基础上, 又分别针对裸露型基岩场地和覆盖型基岩场地的情况, 对第二种修正计算模型的采空区临界埋藏深度计算公式进行了改进和扩展, 从而为更好地指导小窑采空区地基稳定性评价工作提供了参考。

关键词: 极限平衡法; 小窑采空区; 临界埋藏深度; 修正计算模型; 地基稳定性评价

中图分类号: TD82 **文献标识码:** A

Study on evaluation method of foundation stability in small kiln goaf based on limit equilibrium method

TIAN Yingbin¹, LI Kexin¹, ZHAO Huanshuai², YI Sihai³

(1. CCTEG Ecological Environment Technology Co., Ltd., Tianjin 300450, China;

2. China University of Mining & Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

3. School of Safety Engineering, North China Institute of Science & Technology, Langfang 065201, China)

Abstract: The development and utilization of urban construction on the surface of coal mine goaf has

收稿日期: 2024-09-24 责任编辑: 聂虹

基金项目: 国家面上基金资助(编号: 52274165); 中国煤炭科工集团有限公司科技创新创业资金项目资助(编号: 2022-2-ZD004); 中煤科工生态环境科技有限公司科技创新基金资助(编号: 0206KGST0020, 0206KGST0027)

第一作者简介: 田迎斌(1981—), 男, 汉族, 河南获嘉人, 研究员, 主要从事“三下”采煤、开采损害防治与保护、生态修复等方面的研究工作, E-mail: 343763528@qq.com。

引用格式: 田迎斌, 李科心, 赵环帅, 等. 基于极限平衡法的小窑采空区地基稳定性评价方法研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(11): 113-120.

TIAN Yingbin, LI Kexin, ZHAO Huanshuai, et al. Study on evaluation method of foundation stability in small kiln goaf based on limit equilibrium method[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(11): 113-120.

become an effective way to solve the shortage of construction land index in domestic mining cities. In order to provide the basis for urban construction planning and ensure the safety of the proposed building, first of all, it is necessary to evaluate the foundation stability of the goaf site, and then according to the evaluation results, the treatment measures such as building, structure, foundation and goaf treatment can be taken. Among them, the small kiln goaf often becomes a suspended roof area due to its small mining area and insufficient roof caving. Under the action of surface building load, the suspended roof area may have sudden goaf collapse geological disasters, thus endangering the safety of surface buildings and personnel. Limit equilibrium method is one of the commonly used methods to evaluate the stability of foundation in small mine goaf. This method obtains the critical burial depth by establishing the equilibrium equation between roof pressure, building base pressure, self-weight of overlying strata and friction resistance of rock mass. However, there are still differences in the understanding of the concepts of base pressure p and burial depth H parameters in the calculation formula of critical burial depth of small kiln goaf, which leads to the non-uniqueness of calculation results and evaluation conclusions in the evaluation work. The problems existing in the formula are analyzed, and two modified calculation models corresponding to different concept understandings are established. After comparative analysis, it is suggested that the second modified calculation model with stronger applicability should be adopted, and the basic concepts of parameter p and H are clarified, that is, the meaning of parameter p is the average pressure of building basement, and the meaning of parameter H is the burial depth of goaf calculated from building basement. On this basis, the calculation formula of the critical burial depth of the goaf in the second modified calculation model is improved and extended for the bare and covered bedrock sites, so as to provide a reference for better guiding the evaluation of the foundation stability of the small kiln goaf.

Keywords: limit equilibrium method; small kiln goaf; critical burial depth; modified calculation model; evaluation of the foundation stability

0 引言

由于我国多数煤炭资源型矿业城市周边存在着大面积的采空区,导致城市的发展受到一定程度的制约。随着城市建设不断向外扩张,不可避免地面临着如何利用采煤塌陷地进行城镇建设开发利用的问题。为了给城镇建设规划提供依据和保证拟建建筑的安全,必须对采空区场地进行地基稳定性评价^[1-4]。对于大面积长壁开采垮落式管理顶板的采空区,由于上覆岩层垮落较充分,在经历了初始期、活跃期和衰退期后,其地表可逐渐达到稳定状态。此时,在其地表进行工程建设时还应充分考虑到后续的残余沉降及变形影响,并根据地基稳定性评价结果,可以采取建筑、结构、地基基础及采空区注浆处理等单项或综合治理措施^[5-9]。同时,上述城镇周边也可能存在着不少早期小煤矿开采所形成的小窑采空区。小窑采空区是指包括房柱、巷采及巷道等形成的规模较小的地下空间。小窑采空区由于开采面积小、顶板垮落不充分而成为悬顶区,其地表在采后的一定时期内往往没有明显的塌陷现象。但小窑采空区顶板在自重长期作用下或新增建筑荷载作用下,有可能发生突发性的采空塌陷地质灾害,从而严重危及地表建筑及人员安全。因此,对小窑采空区进行地基稳定性评价是采煤塌陷区建筑开发利用前需要进

行的一项重要工作内容。

《岩土工程勘察规范》^[10]规定,小窑采空区可根据建筑物的基底压力、采空区的埋深、范围和上覆岩层的性质等评价地基的稳定性。常用于判断采空区顶板稳定的方法有极限平衡法、厚跨比法、普氏压力拱法、荷载传递线交汇法^[11]、数值分析法^[12-13]等。其中,极限平衡法因其计算公式简单而在小窑采空区稳定性初判时较为常用。极限平衡法中小窑采空区临界埋藏深度计算公式在相关的规范^[14-15]、手册^[16-17]、书籍^[18]及论文^[19-23]中都有所涉及。对小窑采空区地基稳定性进行评价时,通常将采空区顶板的实际埋深与临界埋深进行比较,然后对地基的稳定性做出不稳定、稳定性差或稳定的结论。当小窑采空区顶板的实际埋深小于临界埋深时,认为地基不稳定;当实际埋深大于临界埋深时,认为地基稳定性差或稳定。需要指出的是,上述小窑采空区顶板临界埋藏深度计算公式仅适用于基岩场地。

在工程实践中对于小窑采空区顶板临界埋藏深度计算公式中涉及的有关参数的理解有所不同,主要是指对于小窑采空区埋深和基底压力的取值理解不同。例如,《工程地质手册》和《岩土工程勘察设计手册》在临界埋藏深度计算公式中都未明确采空区埋深是自地面起算还是自基底起算,且前者在公式

中规定基底压力取基底平均压力, 后者规定取基底平均附加压力。另外, 针对覆盖层基岩场地小窑采空区地基稳定性评价的问题上, 在如何考虑覆盖层影响时的处理方法上也不尽相同。例如, 张鑫^[24]直接将松散层厚度以一定比例换算为基岩厚度后代入公式进行计算; 柏森^[25]在公式中考虑了松散层对于顶板岩柱体的摩阻力的影响。但以上处理方法与实际计算模型之间仍存在差异, 且未对原公式存在的缺陷进行本质上的解释与修正。

目前, 对于基于极限平衡法的小窑采空区临界埋藏深度计算公式中所涉有关参数概念的分歧, 以及采空区顶板上含覆盖层时的处理方法, 在其合理性方面的研究及探讨较少。因此, 有必要从本质上对原始公式的来源进行解析、推导和修正, 同时根据实践需要对该公式进行改进, 从而为小窑采空区在不同工程地质条件下的地基稳定性评价工作提供参考。

1 现有评价公式及其存在的问题

1.1 现有评价公式

当拟建建筑物位于小窑采空区地表时, 应当进行采空区地基稳定性评价。极限平衡分析法是《工程地质手册》推荐采用的小窑采空区地基稳定性评价方法之一, 该方法认为小窑采空区顶板的破坏模式是上覆岩柱体沿采空区侧壁竖直方向上呈剪切破坏, 且采用岩体等效内摩擦角按照计算侧向土压力的方法计算岩石侧压力。另外, 因为小窑采空区一般埋深较浅, 顶板岩柱体两侧的摩擦角取 0° , 故岩柱体两侧所受的侧压力方向为水平方向。将水平岩石压力乘以岩体等效内摩擦角的正切值, 就可以转换成采空区上方岩柱体两侧所受的摩阻力。沿竖直方向可以建立采空区顶板压力与建筑基底压力、上覆岩层自重及岩体摩阻力四者之间的平衡方程。在小窑采空区每延米顶板上的力系平衡方程见式(1)。

$$Q = G + Bp - 2F \quad (1)$$

将各具体物理量参数代入式(1)后, 得到式(2)。

$$Q = \gamma HB + Bp - 2 \times \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \tan \phi \quad (2)$$

式中: Q 为小窑采空区顶板上的压力, kPa; p 为建筑物基底平均压力, kPa; G 为小窑采空区单位长度顶板上岩层所受的总重力, kN/m; B 为采空区宽度, m; F 为采空区单位长度侧壁的摩阻力, kN/m; H 为采空区顶板的埋藏深度, m; γ 为顶板以上岩层的容重, kN/m³; ϕ 为顶板以上岩层的等效内摩擦角, ($^\circ$)。

当小窑采空区顶板的埋藏深度 H 较小时, 则计算得出的顶板上的压力 Q 大于 0, 表明小窑采空区顶板在建筑荷载作用下处于不稳定状态, 沿采空区侧

壁的竖直方向上在顶板岩体内发生剪切破坏。当小窑采空区顶板的埋藏深度 H 增大到某一深度, 使其顶板岩体恰好保持自然平衡(即 $Q=0$), 此时的 H 称为临界深度 H_0 。小窑采空区顶板临界埋藏深度的计算见式(3)。

$$H_0 = \frac{\gamma B + \sqrt{\gamma^2 B^2 + 4\gamma B p \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \tan \phi}}{2\gamma \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \tan \phi} \quad (3)$$

根据小窑采空区顶板实际埋深与临界埋深之比, 将地基稳定性分为不稳定、稳定性差和稳定三种情况, 评价标准详见表 1。

表 1 地基稳定性分级

Table 1 Classification of foundation stability

实际埋深与临界埋深之比 (H/H_0)	地基稳定性
< 1.0	不稳定
$[1.0, 1.5]$	稳定性差
> 1.5	稳定

1.2 存在的问题

对于式(1)~式(3), 由于《工程地质手册》中并没有给出对应的配图, 且部分参数概念定义不明确, 造成其他书籍或论文在引用该公式时出现了不同的理解, 从而得出了不同的计算结果, 给工程技术人员造成困扰。经分析总结, 主要存在以下两处争议: 一是对于建筑基底压力 p 的理解不同; 二是对于小窑采空区顶板埋深 H 的理解不同。

1) 对参数 p 的意义理解不同。对于式(1)~式(3)中参数 p 的意义有两种理解: 一种是理解为建筑基底平均压力; 另一种是理解为建筑基底平均附加压力。建筑基底平均压力为基础顶部竖向荷载、基础自重及其回填土重之和除以基础底面积, 主要用于地基承载力验算、基础尺寸设计等方面。建筑基底平均附加压力为建筑基底平均压力减去基底标高处地层的原始自重应力, 主要用于建筑荷载影响深度计算、地基沉降量计算等方面。

基底平均压力 p 计算见式(4)和式(5)。

$$p = \frac{F_k + G_k}{A} \quad (4)$$

$$G_k = \gamma_G dA \quad (5)$$

式中: F_k 为上部结构传至基础顶面的竖向荷载, kN; G_k 为基础自重及其上回填土的重量, kN; γ_G 为基础及其上回填土的平均容重, 一般取 20 kN/m^3 ; d 为基础埋深, m; A 为建筑基底面积, m²。

基底平均附加压力 p_0 计算见式(6)。

$$p_0 = p - \gamma_0 d \quad (6)$$

式中, γ_0 为基础底面以上天然岩土层的加权平均容重, kN/m^3 。

通过上述计算公式可知, 基底平均压力 p 与基底平均附加压力 p_0 是两个完全不同的概念, 只有当基础埋深 d 等于 0, 也就是基底压力直接作用在地表时, 两者才会相等。

对于式(1)~式(3)中参数 p 的不同理解及应用可见诸于国家出版的正式规范及考试中。比如, 国家行业标准《煤矿采空区岩土工程勘察规范》于 2014 年初次出版时^[9], 在规范 12.3.10 条的条文说明中给出了小窑采空区顶板临界深度的参考计算公式。在该公式中将参数 p 定义为基底平均压力, 而在 2017 年再次出版时^[4] 将参数 p 的定义修订为基底附加压力。国家注册岩土工程师考试分别在 2012 年和 2021 年的案例计算中将式(3)作为考点进行了考察, 2012 年的官方标准答案将参数 p 以基底平均附加压力代入公式进行计算, 而 2021 年的官方标准答案将参数 p 以基底平均压力代入公式进行计算。以上情况说明规范制定者和考试命题专家对于参数 p 的理解存在争议, 即对于参数 p 的含义并没有形成统一认识。

2) 对参数 H 的意义理解不同。式(1)~式(3)中将参数 H 定义为采空区顶板的埋藏深度, 但没有明确是从地表起算还是从基底起算的深度。从采矿工程学角度, 采空区顶板埋藏深度一般指的是从地表起算的埋深。但根据有关资料的计算案例, 既有采用从地表起算的埋深, 也有采用自基底起算的埋深。只有当基底标高与地表标高相同时(即 $d=0$), 从地表起算的 H 与从基底起算的 H 两者才相同, 否则, 两者取值不同, 且相差基础埋深。以上情况说明, 对于参数 H 的含义也没有形成统一的认识。

2 现有评价公式的修正与分析

2.1 参数修正及其计算模型

产生前述歧义的根本原因是参数的不同概念对应于不同的力学计算模型, 每种计算模型都有各自

的适用条件和假设前提。如果不对计算临界深度的式(3)中相关参数概念进行明晰和修正, 则在套用该公式进行计算时就会出现分歧和混乱。对式(3)的修正包括以下两种计算模型。

1) 模型一: p 按基底平均附加压力考虑, H 自地表标高起算。图 1(a) 为基岩场地基础埋深 d 为 0 时, 地表作用有荷载 p 的情况, 此时, $p=p_0$, 且基底宽度 b 可以大于采空区宽度 B 。图 1(b) 为基岩场地基础埋深 d 大于 0 时基底作用有附加压力 p_0 的情况, 此时, 基底宽度 b 不大于采空区宽度 B 。图 1(a) 和图 1(b) 中的 H 均指自地表标高起算至采空区顶板标高的埋深。在建立平衡方程和代入参数计算临界埋深 H_0 时, 取 $b=B$ 。需要指出的是采空区顶板岩柱两侧的岩体水平侧压力强度沿深度呈三角形分布, 计算岩体水平侧压力强度时采用岩体等效内摩擦计算, 而不再考虑岩体的内聚力。每一侧的岩体总侧压力按计算土体侧压力方法时的朗肯主动土压力计算。水平向主动土压力合力 E 和竖向摩阻力 F 计算见式(7)和式(8)。

$$E = \frac{1}{2} \gamma H^2 \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \quad (7)$$

$$F = E \tan \phi \quad (8)$$

此时, 以基底附加压力 p_0 和自地表起算的采空区埋藏深度 H 代入式(1)和式(2)即可得到式(3)。

2) 模型二: p 按基底平均压力考虑, H 自基底标高起算。图 2 为基岩场地且基础埋深 d 大于 0 时, 基底作用有荷载 p 的情况, 此时, $p \neq p_0$, 采空区顶板岩柱高度为 H (顶板埋深)。 H 范围内岩柱两侧的实际岩体水平侧压力强度分布应为梯形分布, 若忽略其中矩形部分(虚线部分), 则侧压力沿 H 段的分布就简化为了三角形分布, 岩柱体每侧总水平侧压力 E 可按式(7)计算。图 2(a) 与图 2(b) 两者区别在于基底宽度 b 不同, 但在建立平衡方程时, 均以 $b=B$ 代入计算。图 2 中若基础埋深 d 为 0, 则显然也适用于式(2)。

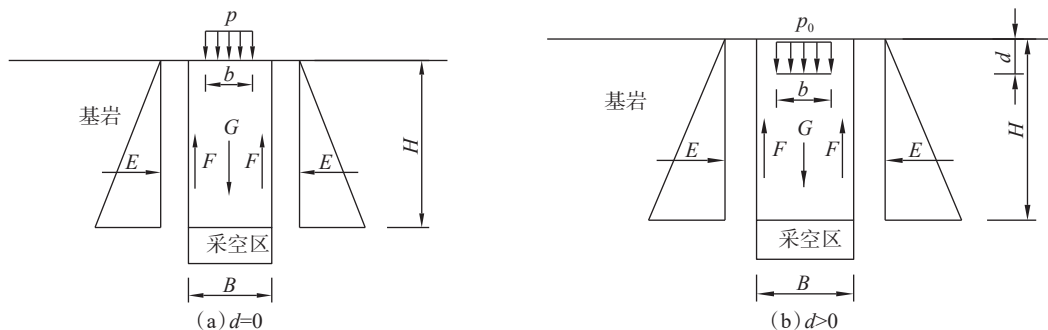


图 1 计算模型一

Fig. 1 Calculation model 1

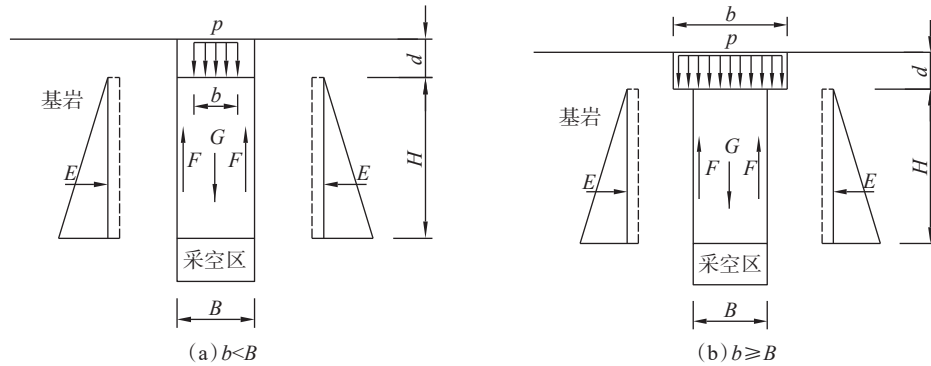


图 2 计算模型二

Fig. 2 Calculation model 2

此时,以基底平均压力 p 和自基底标高起算的采空区埋深 H 代入式(1)和式(2),即可得到式(3)。

2.2 修正后模型仍存在的不足

实际上,上述两种修正后的地基稳定性分析计算模型仍有不足之处。计算模型一:一般适用于基础宽度小于采空区宽度,且没有考虑场地存在第四系松散层的情况;计算模型二:没有考虑场地存在第四系松散层的情况,且采空区顶板岩柱体两侧的岩体水平侧压力强度分布简化为三角形分布,不符合实际的梯形分布。

模型一图 1(a)中基础埋深为 0 时,基底压力分布宽度可以大于采空区宽度;图 1(b)中基础埋深大于 0 时,基底压力分布宽度要求小于采空区宽度。模型二图 2(a)和图 2(b)的基础宽度可以小于、等于及大于采空区宽度。在工程建设实践中由于基础类型多样,包括独立基础、条形基础、筏板基础等,特别是筏板基础底面积往往比较大而经常跨越采空区,所以,计算模型二更具有通用性。但又由于计算模型二在采空区顶板岩柱体的侧压力强度分布方面进行了简化而不符合实际应力分布,且未考虑场地存在第四系松散层的情况,因此,有必要在模型二的基础上对式(3)进行改进,从而得出对应的小窑采空区临界埋深计算深度 H_0 。

3 地基稳定性评价公式的改进

3.1 基岩场地地基稳定性评价公式改进

基岩场地是指不存在第四系松散层的裸露型岩石场地。此时,推导小窑采空区基岩场地地基稳定性评价公式时的基本规定如下所述。

- 1)采空区埋深 H 自基底起算。
- 2)采空区顶板岩柱体两侧的岩体侧压力分布为梯形分布。
- 3)当基底宽度 b 小于采空区宽度 B 时,仍取 $b=B$ 。

基岩场地条件下小窑采空区改进后的地基稳定性评价计算模型如图 3 所示。

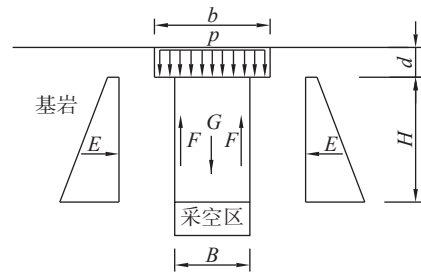


图 3 基岩场地

Fig. 3 Bedrock site

当式(1)中小窑采空区顶板压力为 0 时力的平衡方程,见式(9)。

$$Q = \gamma HB + Bp - 2 \times \frac{1}{2} \left[\gamma(H+d)^2 - \gamma d^2 \right] \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \tan \phi = 0 \quad (9)$$

解方程可得基岩场地条件下小窑采空区临界埋藏深度 H_0 , 见式(10)。

$$H_0 = \frac{\gamma B - 2\gamma K_1 d + \sqrt{(\gamma B - 2\gamma K_1 d)^2 + 4\gamma B p K_1}}{2\gamma K_1} \quad (10)$$

式中, $K_1 = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \tan \phi$ 。

当式(10)中的基础埋深 d 等于 0 时,式(10)则简化为式(3)。

3.2 覆盖型基岩场地地基稳定评价公式改进

覆盖型基岩场地是指基岩上部覆盖有第四系松散层的隐伏型岩石场地。此时,推导小窑采空区地基稳定性评价公式时的基本规定如下所述。

- 1) H 自基底起算。
- 2)计算采空区上覆岩土体重力 G 时包含顶板岩层和土层自重。
- 3)采空区顶板岩柱两侧的岩石侧压力分布为梯形分布。

4)不考虑采空区顶板土柱段的摩阻力。

5)当荷载分布宽度 b 小于采空区宽度 B 时,取 $b=B$ 。

覆盖型基岩场地条件下小窑采空区改进后的地基稳定性评价计算模型如图4所示。

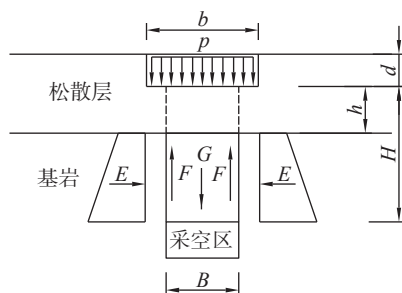


图4 覆盖型基岩场地

Fig. 4 Site with covered bedrock

当式(1)中采空区顶板压力为0时的平衡方程,见式(11)。

$$Q = \gamma_{m2} B h + \gamma B (H - h) + B p - 2 \left[\gamma_{m1} (h + d) + \frac{1}{2} \gamma (H - h) \right] (H - h) K_1 = 0 \quad (11)$$

解方程可得覆盖型基岩场地条件下小窑采空区临界埋藏深度 H_0 , 见式(12)。

$$H_0 = \frac{M + \sqrt{M^2 + 4\gamma K_1 N}}{2\gamma K_1} \quad (12)$$

式中: $M = \gamma B + 2(\gamma - \gamma_{m1}) h K_1 - 2\gamma_{m1} K_1 d$; $N = B p + \gamma_{m2} B h + 2\gamma_{m1} (h + d) h K_1$; $K_1 = \tan^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \tan \phi$; γ_{m1} 为 $h+d$ 范围内松散层加权平均天然容重; γ_{m2} 为 h 范围内松散层加权平均天然容重; h 为基底下松散层厚度。

当式(12)中的 h 等于0时,则式(11)简化为式(10)。

4 工程应用

某城镇拟利用郊区一小窑采空区进行工程建设,该小窑采空区地表局部为裸露基岩场地,局部覆盖第四系松散层。拟在其地表规划建设建筑物,建筑物基底平均压力为200 kPa。采空区上覆岩体重度25 kN/m³,松散层平均容重20 kN/m³,岩体等效内摩擦角50°。

裸露基岩场地拟建建筑基础埋深5 m,其下方分

布有宽度不同的采空区,采空区宽度分别为3 m、5 m和10 m,且各采空区实际埋深分别为22 m、54 m和109 m。确定采空区实际埋深的原则是以采空区顶板最浅标高处为准。根据式(3)、式(10)计算小窑采空区临界埋藏深度,计算结果见表2。由表2可知,由于式(10)中采空区上覆岩柱体两侧摩阻力按实际受力情况考虑后较式(3)得以提高,所以其计算的临界深度较式(3)计算结果要小些。当采空区宽度为3 m,自基底起算的实际埋深为22 m时,用式(3)计算并判断后地基稳定状态为不稳定;用式(10)计算并判断后地基稳定状态为稳定性差。当采空区宽度为5 m,自基底起算的实际埋深为54 m时,用式(3)计算并判断后地基稳定状态为稳定性差;用式(10)计算并判断后地基稳定状态为稳定。当采空区宽度为10 m,自基底起算的实际埋深为109 m时,用式(3)计算并判断后地基稳定状态为稳定;用式(10)计算并判断后地基稳定状态为稳定。综上所述,在相同条件下,采用式(10)比采用式(3)计算得出的地基稳定性偏好些且更符合实际,这样有些时候就可以避免对采空区进行过度处理(回填、压力灌浆等),以及对建筑物基础及上部结构刚度进行过度加强,从而控制建设成本的过度增加。

该小窑采空区局部为覆盖型基岩场地,拟建建筑物基础埋深为5 m,采空区宽度为5 m,则当基底下松散层厚度分别为5 m、10 m和15 m时,根据式(12)计算采空区的临界埋藏深度,计算结果见表3。由表3可知,当自基底起算的实际采空区埋深为60 m,基底下松散层厚分别为5 m、10 m和15 m时,计算出的采空区临界埋藏深度分别为38 m、44 m和51 m,用式(12)计算并判断后地基稳定状态分别为稳定、稳定性差和稳定性差。

5 结论

1)对于小窑采空区地基稳定性评价,指出了《工程地质手册》《煤矿采空区岩土工程勘察规范》等中小窑采空区临界埋藏深度计算公式中部分参数概念不明确,以及计算模型不唯一的问题。该问题是造成小窑采空区临界埋藏深度计算公式在使用过程中参数取值较随意从而得出不同计算结果和评价结论

表2 基岩场地不同采空区宽度临界深度计算

Table 2 Calculation of critical depth for different goaf widths in bedrock sites

采空区宽度 B/m	自基底起算 实际埋深 H/m	式(3)			式(10)		
		H_0/m	$1.5H_0/\text{m}$	稳定状态	H_0/m	$1.5H_0/\text{m}$	稳定状态
3	22	25	38	不稳定	18	27	稳定性差
5	54	38	57	稳定性差	30	45	稳定
10	109	71	107	稳定	62	93	稳定

表 3 基底不同松散层厚度临界深度计算

Table 3 Calculation of critical depth for different loose layer thicknesses under the substrate

基底下 松散层厚 h/m	自基底起算 实际埋深 H/m	式 (12)		
		H_0/m	$1.5H_0/m$	稳定状态
5	60	38	57	稳定
10	60	44	66	稳定性差
15	60	51	77	稳定性差

的根本原因。

2) 针对式 (2) 建立了与参数 p 及参数 H 不同概念相对应的两种修正计算模型, 分析了两种计算模型的适用条件及各自存在的不足, 并将计算模型二作为优选计算模型。同时, 明确了参数 p 的意义为建筑物基底平均压力, 参数 H 的意义为自建筑物基底起算的采空区埋藏深度。

3) 在修正计算模型二的基础上对地基稳定性评价公式进行了裸露基岩场地和覆盖型基岩场地两种情况下的改进, 并推导总结了相应的临界深度计算公式, 为不同场地条件下地基稳定性评价提供了依据。

4) 建议《煤矿采空区岩土工程勘察规范 (2017 年版)》今后再次修订时, 应将小窑采空区地基稳定性评价公式中的参数 p 重新定义为建筑物基底平均压力, 将参数 H 的定义明确为自建筑物基底起算的采空区埋藏深度。同样, 《工程地质手册》(第五版) 今后再次修订时, 应将参数 H 的定义明确为自建筑物基底起算的采空区埋藏深度。

参考文献 (References):

- [1] 李学良, 孙光, 田迎斌. 复杂老采空区上方工程建设的适宜性评价[J]. 黑龙江科技大学学报, 2022, 32(2): 155-159.
LI Xueliang, SUN Guang, TIAN Yingbin. Suitability evaluation of engineering construction above complex old goaf[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2022, 32(2): 155-159.
- [2] 胡炳南, 郭文砚. 我国采煤沉陷区建筑利用关键技术及展望[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 67-74.
HU Bingnan, GUO Wenyan. Key technologies and expectation of building utilization in coal mining subsidence areas in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 67-74.
- [3] 崔年生, 郭泽洋. 已关闭矿井老采空区稳定性评价方案研究[J]. 中国矿业, 2023, 32(7): 55-61.
CUI Niansheng, GUO Zeyang. Study on stability evaluation scheme of old goaf in closed mine[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(7): 55-61.
- [4] 石磊. 煤矿采空区场地地基稳定性及适宜性分析[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(2): 128-133.
SHI Lei. Analysis on the stability and suitability of the ground in goaf[J]. Geotechnical Engineering Technology, 2021, 35(2):

- 128-133.
- [5] 朱广铁, 孙传博, 高智广, 等. 采动地表稳定性评价与建筑抗变形工艺[J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2019, 31(1): 39-43.
ZHU Guangyi, SUN Chuanbo, GAO Zhiguang, et al. Stability evaluation of mining foundation and building anti-deformation process[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2019, 31(1): 39-43.
- [6] 郭轲轶, 张洋洋. 小煤窑采空区新建大型建筑物地基注浆处理与安全技术实践[J]. 山东煤炭科技, 2023, 41(9): 200-202.
GUO Keyi, ZHANG Yangyang. Foundation grouting treatment and safety technology practice for newly built large buildings in goaf of small coal mines[J]. Shandong Coal Science and Technology, 2023, 41(9): 200-202.
- [7] 滕永海, 唐志新. 老采空区地面建筑技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(1): 183-186.
TENG Yonghai, TANG Zhixin. Study and application of building construction technology on surface ground above mine goaf[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 183-186.
- [8] 朱伟. 采煤塌陷区土地建筑利用技术与工程应用[J]. 金属矿山, 2019(11): 176-181.
ZHU Wei. Construction utilization technology and engineering application of the land in coal mining subsidence area[J]. Metal Mine, 2019(11): 176-181.
- [9] 孙世国, 柏朝梅, 魏帅颖, 等. 老采空区地表新建建筑物的安全设计方法[J]. 陕西煤炭, 2024, 43(6): 87-91.
SUN Shiguo, BAI Chaomei, WEI Shuaiying, et al. Safety design method of new surface buildings above the old goaf[J]. Shaanxi Coal, 2024, 43(6): 87-91.
- [10] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范 [2009 年版]: GB 50021—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [11] 田志恒, 聂永祥. 复杂采空区顶板最小安全厚度的确定方法[J]. 采矿技术, 2009, 9(5): 26-27, 151.
TIAN Zhiheng, NIE Yongxiang. Method for determining the minimum safe thickness of complex goaf roof[J]. Mining Technology, 2009, 9(5): 26-27, 151.
- [12] 邵龙潭, 王浩然, 姜泽涵. 基于有限元极限平衡法的岩土结构稳定分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(12): 170-177.
SHAO Longtan, WANG Haoran, JIANG Zehan. Stability analysis of geotechnical structures based on finite element limit equilibrium method[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(12): 170-177.
- [13] 何荣兴, 韩智勇, 刘洋, 等. 基于数值模拟正交试验的采空区稳定性因素的敏感性分析[J]. 中国矿业, 2022, 31(6): 109-117.
HE Rongxing, HAN Zhiyong, LIU Yang, et al. Sensitivity analysis of stability factors of goaf based on numerical simulation orthogonal test[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(6): 109-117.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤矿采空区岩土工程勘察规范: GB 51044—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤矿采空区岩土工程勘察规范 [2017 年版]: GB 51044—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [16] 化建新, 郑建国. 工程地质手册 (第 5 版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [17] 林宗元. 岩土工程勘察设计手册 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1996.

- [18] 张永波, 孙雅杰, 卢正伟, 等. 老采空区建筑地基稳定性评价理论与方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [19] 史卫国, 崔鹏伟, 薛飞. 小窑采空区变电站采动变形特征及稳定性评价[J]. [山西建筑](#), 2019, 45(8): 47-49.
SHI Weiguo, CUI Pengwei, XUE Fei. The deformation characteristics and the estimation of stability of the small coal pit under a substation[J]. [Shanxi Architecture](#), 2019, 45(8): 47-49.
- [20] 郝喆. 小窑采空区地质灾害综合评价研究[J]. [地质与资源](#), 2019, 28(4): 394-400.
HAO Zhe. Comprehensive assessment on the geological disasters in small pit goaf[J]. [Geology and Resources](#), 2019, 28(4): 394-400.
- [21] 李晓玮. 门头沟采空棚户区地块勘察及稳定性评价[J]. [城市地质](#), 2019, 14(4): 61-71.
LI Xiaowei. Stability evaluation of Mentougou Goaf Shanty Area[J]. [Urban Geology](#), 2019, 14(4): 61-71.
- [22] 宋恩武, 曾纯品, 韩建江. 浅析小窑采空区综合勘察研究与应用[J]. [科技信息](#), 2014(15): 311, 316.
SONG Enwu, ZENG Chunpin, HAN Jianjiang. Analysis of comprehensive survey and application of small kiln goaf[J]. [Science & Technology Information](#), 2014(15): 311, 316.
- [23] 李文博, 彭超, 张洪岩, 等. 地面竖直荷载作用下采空区临界扰动深度及其稳定性研究[J]. [中国矿业](#), 2021, 30(3): 149-154.
LI Wenbo, PENG Chao, ZHANG Hongyan, et al. Research on critical disturbance depth and stability of goaf under vertical ground load[J]. [China Mining Magazine](#), 2021, 30(3): 149-154.
- [24] 张鑫. 如何对小窑采空区稳定性进行评价[J]. [西部探矿工程](#), 2018, 30(5): 167-169.
ZHANG Xin. How to evaluate the stability of small kiln goaf[J]. [West-China Exploration Engineering](#), 2018, 30(5): 167-169.
- [25] 柏森. 小窑采空区稳定性评价公式的改进[J]. [露天采矿技术](#), 2017, 32(7): 81-83.
BAI Miao. Improvement of evaluation formula of stability in small kiln goaf[J]. [Opencast Mining Technology](#), 2017, 32(7): 81-83.