

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.057



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



渗流力和结构面水弱化作用下裂隙岩体 边坡块体的稳定性

王惠栋, 段秦生, 宋锋锋, 璩臻

(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

摘要:裂隙岩体渗流是影响岩体稳定性的重要因素之一。裂隙中的流体流动不仅会产生渗流力,而且会降低裂隙面的强度,致使边坡失稳、隧道塌方等事故频发。为揭示渗流作用对裂隙岩体边坡块体稳定性的作用机理,基于关键块体理论,提出一种同时考虑渗流力和结构面水弱化作用的稳定性分析方法,其中,渗流力基于渗流理论和统一管网法计算,结构面水弱化根据经验公式确定。以某岩质边坡为例,采用该方法对边坡在渗流作用下的块体稳定性开展研究。研究结果表明,渗流力与结构面水弱化作用对裂隙岩体边坡块体稳定性的作用方式不同,渗流力既会改变块体的抗滑力又会改变块体的滑动力,对块体稳定性的影响较为复杂,包括改变块体的稳定状态、滑动面、失稳形式;结构面水弱化只降低块体的抗滑力,进而降低块体的稳定性,不改变块体的失稳形式。此外,对于裂隙边坡工程,通常存在一个最危险渗流压力值。

关键词:关键块体理论;渗流力;结构面水弱化;块体稳定性;裂隙岩体

中图分类号:TU457 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)04-0050-10

Block stability of fractured rock slope under seepage pressure and fracture water weakening

WANG Huidong, DUAN Qinsheng, SONG Fengfeng, QU Zhen

(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

Abstract: Fluid flow in fractures is one of the important factors affecting rock mass stability. The fluid in the fracture not only produce external pressure but also weaken the fracture strength. Therefore, engineering accidents including slope instability and tunnel collapse frequently occur. In order to explore the mechanism of seepage on the block stability of fractured rock masses, this study proposes a stability analysis method considering both seepage force and effect of fracture strength weakening by water, based on the Key Block Theory (KBT). In this method, the fluid pressures in fractures are simulated by Unified Pipe-network Method (UPM), and the relationship between fracture strength's weakening and fluid pressures is determined by an empirical formula. This method is adopted to study the influence of seepage on the stability of a fractured rock slope. Results show that the action modes of seepage pressure and fracture water weakening on slope stability of fractured rock masses are different. The seepage force affects both the anti-sliding force and sliding force of the

收稿日期:2022-02-14

基金项目:国家自然科学基金(52008153、U1965204、52061160367、U2067203)

作者简介:王惠栋(1989-),男,博士,主要从事裂隙岩体渗流及稳定性研究,E-mail:huidongwang@hebut.edu.cn。

Received: 2022-02-14

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 52008153, U1965204, 52061160367, U2067203)

Author brief: WANG Huidong (1989-), PhD, main research interests: fluid flow and stability analysis of fractured rock masses, E-mail: huidongwang@hebut.edu.cn.

block. Therefore, the influence of seepage force on the block stability is more complicated, including changes of the block stability states, sliding surface, and the instability pattern. Fracture water weakening only reduces the anti-sliding force of blocks, and then reduces the stability of block, while not change the instability pattern of unstable block. Moreover, there is generally a critical pressure which is the most dangerous for rock slope engineering.

Keywords: key block theory; seepage pressure; fracture water weakening; block stability; fractured rock masses

岩体是由结构面和结构体组成的具有不连续性、非均质性和各向异性,且赋存于一定地质环境中的地质体^[1]。因地质构造作用,岩体中存在着诸如材料界面、断层、软弱夹层、节理等不连续结构面。在岩石水力学中,不连续结构面统称为裂隙。通常,岩体裂隙相较岩体基质具有较大的渗透率,是流体的主要渗流通道^[2]。岩体裂隙中的流体不仅会产生渗流力,还会降低结构面的强度,对裂隙岩体的稳定性具有显著影响^[3-4]。渗流作用对裂隙岩体的稳定性影响机理是岩体工程重点解决的问题之一。

在裂隙岩体的稳定性分析方法中,关键块体理论能较好地分析结构面对块体稳定性的影响,且具有计算简便高效、理论严密、能解决三维实际问题的特点,是岩体工程实践中广泛使用的一种方法^[5-7]。关键块体理论最早由石根华^[8]和 Goodman等^[9]于1985年提出,自提出以来,其理论不断发展。现有对关键块体理论的研究,考虑重力、锚杆力较多,而考虑渗流影响的较少,且多集中在渗流力对块体稳定性的影响。许强等^[10]简化水压在结构面上的分布形式,采用矢量法对块体各结构面的静水压力进行计算。邬爱清等^[11-12]提出一种考虑块体侧面一般水压分布模式下的块体稳定性计算方法,并实现了水载荷下的关键块体稳定性评价。高开卫等^[13]也运用该方法评价了渗流力条件下的拱坝坝肩边坡的稳定性。徐栋栋等^[14]利用 UDEC 确定块体上渗流压力分布模式并计算了渗流力大小。高剑锋等^[15]基于三维激光扫描技术研究了暴雨工况下渗流对高陡边坡块体稳定性的影响。黄岫等^[16]通过地下水位高程计算水压力,利用面水压力求三棱锥的体积。李伟等^[17]引入初始静水压力和传递效应的概念,提出新的水压分布形式,对传统结构面水压分布假设进行了改进。在已有考虑渗流力影响的关键块体理论研究中,对渗流力的计算多采用静水压力的经验公式,这种方式虽然计算简便,但精度欠佳,且不适用于地下承压水和流动状态的水。除渗流力外,结构面的水弱化作用也对块体的稳定性有显著的影响。杨宝全等^[18-19]通过水岩耦合三轴压缩试验,研究水压力对锦屏一级高拱坝坝肩软岩和结

构面强度的弱化影响。张峰瑞等^[20]开展了孔隙水压力下锯齿状结构面的剪切蠕变试验,发现随着孔隙水压力的增大,结构面破坏应力和长期强度均呈现明显降低的趋势。目前,对综合考虑渗流力和结构面水弱化作用的裂隙岩体块体稳定性研究鲜有报道。

笔者基于关键块体理论,精细化考虑渗流力和结构面水弱化作用对裂隙岩体块体稳定性的影响,其中,渗流力基于渗流理论和统一管网法计算,结构面水弱化作用根据试验确定。最终,基于关键块体理论建立一种考虑渗流作用的裂隙岩体块体稳定性分析方法,并采用该方法对渗流作用下的岩质边坡块体稳定性开展相关研究。

1 理论与方法

基于关键块体理论提出考虑渗流力和结构面水弱化作用的裂隙岩体块体稳定性分析方法,涉及的理论包括渗流理论和渗流力的计算、结构面水弱化理论以及考虑渗流作用的关键块体分析理论。

图1所示为裂隙岩体渗流作用示意图,以裂隙切割形成的块体B₀为例,由于流体流动和静水压力作用,岩体节理面上作用有渗流力,同时,流体会弱化结构面的强度,降低结构面的抗滑力。在渗流力和结构面水弱化的作用下,岩体的滑动力和抗滑力会发生变化,从而影响块体的稳定性。

1.1 离散裂隙网络渗流理论与统一管网法

对于裂隙岩体,流体流动通常发生在渗透率较大的岩体裂隙中,因此,很多情况下可忽略岩体基质的渗透性。只考虑岩体裂隙渗流的裂隙岩体模型被称为离散裂隙网络模型,其以各裂隙及裂隙交叉点节点处的流体质量平衡原理为基础,建立控制方程,并将裂隙渗流的运动方程代入,从而获得关于渗流力或水头的矩阵方程,最后辅之以合适的初始条件和边界条件即可求解出相应的渗流力。

只考虑岩体裂隙的渗透性,假设流体的流动状态为稳定渗流,流体运动方程符合达西渗流规律,岩体裂隙为各向同性的均匀介质。对于稳态渗流,其渗流控制方程为

$$\mathbf{v} \cdot (\rho \mathbf{v}) - \rho Q = 0 \quad (1)$$

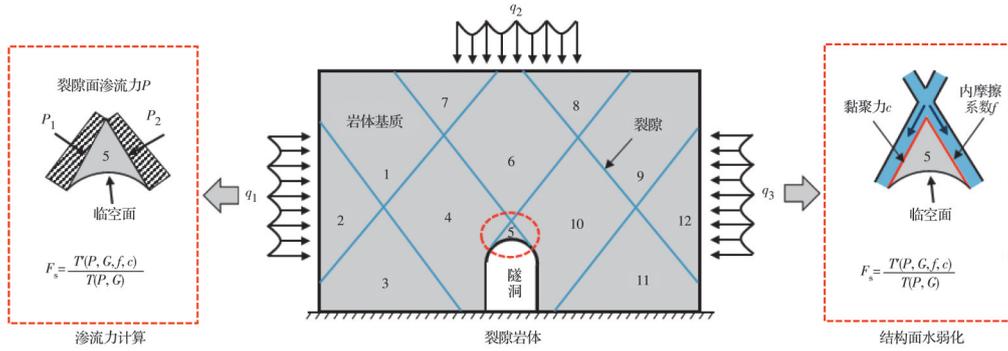


图 1 裂隙岩体渗流作用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of seepage effect of fractured rock mass

式中： ρ 为流体的密度； v 为流体速度矢量； Q 为源汇项。

对于裂隙渗流，目前应用广泛的流体运动方程是立方定律，它是在单裂隙为平行板模型，流体不可压缩的假设下，通过流体动力学(Navier-Stokes方程)推导而得，方程形式为^[2]

$$q = -\frac{b_h^3}{12\mu} \nabla \cdot (p - \rho g z) = K b_h \nabla \cdot (p - \rho g z) \quad (2)$$

式中： q 为流体的流量； μ 为流体的动力黏滞系数； p 为流体的压力； g 为竖直方向的重力常数； z 为重力方向坐标轴； b_h 为裂隙的水力隙宽； K 为岩体裂隙的渗透系数， $K = b_h^2 / (12\mu)$ 。立方定律是基于平行板模型假设推导而得的，但在实际情况中，由于真实的裂隙通常是粗糙的，并非严格符合平行板模型。因此，其中的水力隙宽 b_h 并非真实物理隙宽，是指水力特性符合立方定律的隙宽。相应地，流体的流速可表示为

$$v = \frac{q}{b_h} = -\frac{b_h^3}{12\mu} \nabla \cdot (p - \rho g z) \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)可得稳态条件下以压力表示的岩体裂隙渗流控制方程。

统一管网法是近年发展的一种具有较高计算精度的模拟三维裂隙岩体渗流的数值模拟方法。已有学者的研究成果均有效证明了统一管网法在解决裂隙岩体渗流模拟方面的适用性和精确性^[21-25]。统一管网法的基本理论为：将岩体裂隙和岩体基质均等效为一维虚拟管道，并假设流体在虚拟管道中流动，该方法具有概念简单、易于编程的特点。图2所示为统一管网法的基本原理图。其中，图2(a)所示为一岩体中的离散裂隙网络网格划分图。对于三维裂隙岩体，其裂隙可表示为一定厚度的二维平面，为适应复杂的边界，本研究采用非结构化网格形式，如图2(b)所示的裂隙面网络图。

为保证等效前后裂隙面中的流体流量和压力一样，需要计算管网的等效渗透率。统一管网法是

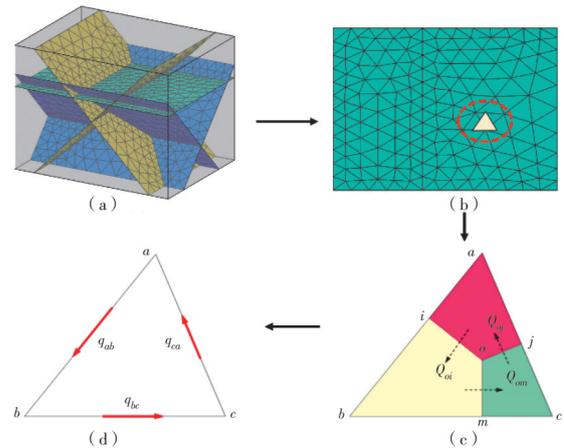


图 2 裂隙管网等效示意图

Fig. 2 Equivalent diagram of fractured pipe network

基于流量相等的原则把流体在裂隙中的流动等效为在管网中流动。图2(c)为图2(b)中某三角单元，三角形的边即为等效的虚拟管道 p_{ab} 、 p_{bc} 和 p_{ca} ，以其为例，管网法把流体在区域 $oiaj$ 与区域 $ombi$ 之间的流动等效为流体在管道 p_{ab} 中的流动，在区域 $ombi$ 与区域 $ojcm$ 之间的流动等效为流体在管道 p_{bc} 中的流动，在区域 $ojcm$ 与区域 $oiaj$ 之间的流动等效为流体在管道 p_{ca} 中的流动。图2(d)中三角形单元的两条边 ab 、 bc 和 ca 即为等效后的渗流管道。等效渗透率的具体推导过程可参考文献[16]，针对该三角形单元，其等效渗透率具体计算公式为

$$\bar{K}_{ip_{ab}} = \frac{l_{oi} b_h^2}{12 l_{ab} \mu}, \bar{K}_{ip_{bc}} = \frac{l_{om} b_h^2}{12 l_{bc} \mu}, \bar{K}_{ip_{ca}} = \frac{l_{oj} b_h^2}{12 l_{ca} \mu} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)便可得到每个管道的等效流量

$$\begin{aligned} q_{ab} &= -\frac{l_{oi} b_h^3}{12 l_{ab} \mu} \nabla \cdot (p - \rho g z), \\ q_{bc} &= -\frac{l_{om} b_h^3}{12 l_{bc} \mu} \nabla \cdot (p - \rho g z), \\ q_{ca} &= -\frac{l_{oj} b_h^3}{12 l_{ca} \mu} \nabla \cdot (p - \rho g z) \end{aligned} \quad (5)$$

根据管网交叉点处流量守恒原理，可列出统一

管网法对应的渗流控制方程。以某一节点 a 为例,其流量守恒方程形式为

$$\sum_{b=1}^{N_a} q_{ab} = Q_{sa} \quad (6)$$

式中: a 为节点编号; N_a 为与节点 a 相连的管道数量; Q_{sa} 为节点 a 的源汇项。

将式(5)代入式(6)即可得到以压力表示的统一管网法的裂隙渗流控制方程

$$\sum_{b=1}^{N_a} \bar{K}_{[p,a]} [(p_a - \rho g z_a) - (p_b - \rho g z_b)] = Q_{sa} \quad (7)$$

1.2 结构面水弱化效应

渗流条件下岩体结构面的黏聚力 c 和内摩擦系数 f 的弱化规律,可通过水岩耦合三轴压缩试验获得。杨宝全等^[18-19]针对锦屏一级高拱坝坝肩软岩和结构面试样,通过大量水岩耦合三轴压缩试验获得了断层强度参数与渗流力的关系曲线。研究表明,渗流力对黏聚力的降低较为明显,对内摩擦系数影响较小,可忽略不计。

根据前人研究成果,提出如图3所示的结构面黏聚力水弱化计算模型。结构面黏聚力 c_i 的弱化分两种情况,当渗流力 P 小于黏聚力丧失临界渗流力 P_c 时,黏聚力与渗流力呈线性关系,结构面的水弱化与渗流力值的关系为

$$c_i = -\alpha P + c_0, \quad P < P_c \quad (8)$$

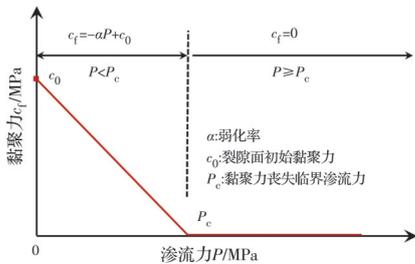


图3 结构面黏聚力水弱化计算模型

Fig. 3 Calculation model of structural surface water weakening

当渗流力 P 大于或等于黏聚力丧失临界渗流力 P_c 时,结构面黏聚力不再随渗流力发生变化,结构面黏聚力大小为0。

1.3 考虑渗流力作用的关键块体理论

关键块体理论假设岩体结构面为平面,岩体块体为刚体,块体失稳为岩体在各种荷载下沿着结构面产生剪切滑移或脱落。该方法不考虑块体和结构面变形、开裂及岩体本身的强度破坏。

块体的稳定性主要通过块体安全系数 F_s 判断。作用在块体上的力主要有块体自重和裂隙面渗流力,块体的主动力合力计算公式为

$$\vec{r}_k = \vec{G}_k + \sum_{i=1}^n \vec{P}_{k,i} \quad (9)$$

式中: r_k 为块体 k 所受主动力合力; G_k 为块体 k 自重; n 为块体 k 包含的裂隙面数量; $P_{k,i}$ 为组成块体 k 裂隙面 i 上渗流力大小。

通过统一管网法计算得到的渗流力为面力,在计算中,需要通过面积分的方法将渗流面力转化为渗流合力,合力垂直于相应的裂隙面,并指向块体内部。图4所示为渗流面力转换为渗流合力的原理示意图。

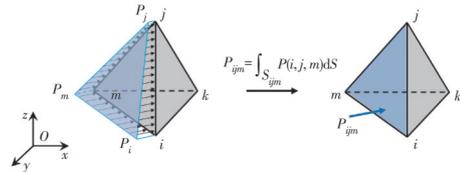


图4 块体面渗流合力计算原理示意图

Fig. 4 Calculation process of seepage force on block surface

采用刚体极限平衡法计算块体安全系数。在关键块体理论中,块体的失稳模式主要包括自由脱落、单面滑动和双面滑动3种,不同失稳模式的块体,其安全系数计算公式不同,但均是滑动力与抗滑力的比值。一般认为,当块体的失稳模式为自由脱落时,其安全系数大小为0。

2 渗流作用下的裂隙岩体边坡块体稳定性

2.1 边坡模型建立

参考雅砻江锦屏二级水电站拦河闸坝和进水口边坡中某处的地质资料,建立如图5所示的边坡模型。该边坡高80 m,分上下两阶,上阶边坡较缓,宽30 m,高20 m,下阶边坡较陡,宽30 m,高60 m。边坡内部发育有5组随机裂隙,每组结构面的平均倾角均为45°,平均倾向分别为45°、90°、135°、225°与315°。假设三维裂隙面中心点位置与产状均为均匀分布,采用蒙特卡罗方法随机生成46条节理面,节理面玫瑰花图如图5(a)所示。经节理面切割而成的边坡块体模型如图5(c)所示,共形成8 338个有限块体。边坡左侧作用有线性梯度水压力,边坡顶部水压力值为 p_{\min} ,底部水压力值 $p_{\max} = p_{\min} + \gamma_w h$ 。模型右侧有一20 m高的流出水位,边坡边界与模型尺寸如图5(b)所示。该边坡岩体密度 ρ 为2 500 kg/m³,重力常数 g 取9.8 N/kg,结构面初始黏聚力 c_0 为0.2 MPa,内摩擦角 θ 为22.39°。

2.2 边坡块体稳定性分析

2.2.1 无渗流作用

为对比研究渗流作用对边坡稳定性的影响,首

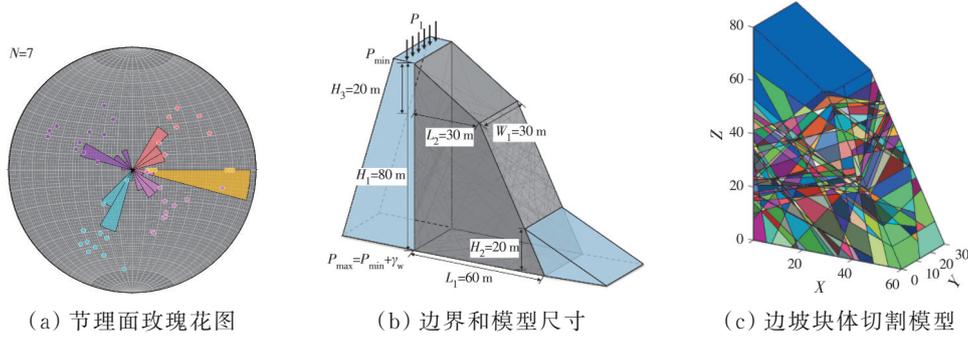


图 5 裂隙岩体边坡模型

Fig. 5 Fractured rock slope model

先计算无渗流作用下的裂隙岩体边坡稳定性。块体安全系数值 F_s 取 1.5, 经计算共有 5 个关键块体。块体编号、体积、失稳模式以及安全系数信息如表 1 所示。

表 1 关键块体信息

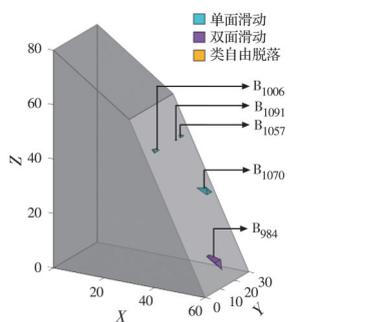
Table 1 Key block information

块体编号	块体体积/ m^3	失稳模式	安全系数 F_s
B ₉₈₄	10.17	双面滑动	0.83
B ₁₀₀₆	1.10	单面滑动	0.88
B ₁₀₅₇	0.27	单面滑动	0.88
B ₁₀₇₀	3.84	单面滑动	0.99
B ₁₀₉₁	0.01	单面滑动	0.88

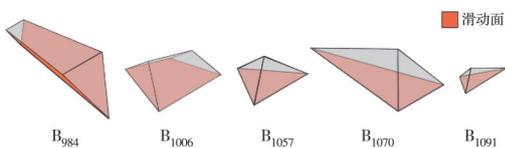
计算得到的关键块体位置如图 6(a) 所示, 关键块体形状如图 6(b) 所示, 其中橙色面表示块体滑动面。当考虑结构面时黏聚力 $c=c_0$, 上述的 5 个块体的安全系数 F_s 均大于 1.5, 无满足条件的关键块体。

2.2.2 渗流力的影响

对边坡模型左侧施加两组不同的线性梯度压



(a) 满足条件的关键块体位置

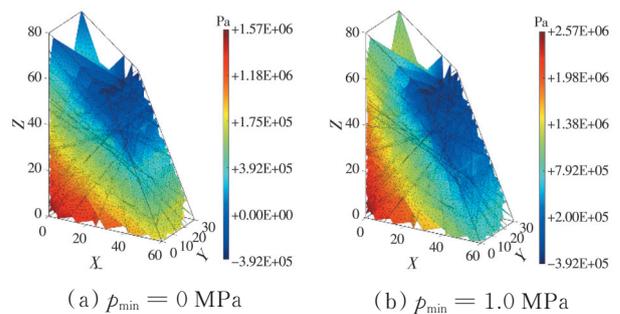


(b) 关键块体形状

图 6 关键块体的位置与形状

Fig. 6 Position and shape of key blocks

力: 1) $p_{min}=0$ MPa, $p_{max}=0.8$ MPa; 2) $p_{min}=1.0$ MPa, $p_{max}=1.8$ MPa。模型右侧有一 20 m 高的水头压力。模型右侧自由水面以上的边坡坡面与大气连通, 为自由渗出面, 前后两侧假设为不透水边界。基于统一管网法计算得到的裂隙面渗流力云图如图 7 所示。



(a) $p_{min} = 0$ MPa (b) $p_{min} = 1.0$ MPa

图 7 不同压力边界条件下渗流力云图

Fig. 7 Seepage pressure cloud under different pressure boundary conditions

需要注意的是, 在采用统一管网法计算渗流压力时, 为考虑重力的影响, 是以总水头压力值为未知量的。为求裂隙面中渗流力的值, 需要在总水头压力值的基础上减去位置水头的压力, 图 7 所示正是该渗流力的值。从图中可以看出, 渗流力的值会出现小于 0 的情况, 渗流力值小于 0 的区域表示该区域没有水流作用; 渗流力值大于 0 的区域表示该区域有水流作用; 渗流力值等于 0 的位置为自由水面。在进行稳定性分析中, 边坡中自由面以上的负压力区域不受渗流作用的影响, 此处的渗流力值取零计算。

不考虑结构面黏聚力 c 时, 不同渗流力影响下的关键块体如图 8 所示。其中, 图 8(a)、(b) 分别为两组渗流压力条件下的关键块体, 对比图 6(b) 可以看出, 在考虑渗流力的条件下, 坡面上的关键块体明显增加, 说明渗流力通常不利于裂隙岩体的稳定性。仔细对比可以发现, 对于部分块体, 渗流力可以增加块体的稳定性。例如, 块体 B₁₀₇₀ 在不考虑渗

流力条件下属于单面滑动块体,考虑渗流力影响后,将不再属于关键块体。对其所受的渗流力进行分析,发现渗流力合力与重力方向相反,向上挤压块体,从而增加了块体的抗滑力,提高了其稳定性。另外,对比块体的失稳模式可知,不考虑渗流力条件下,块体 B₁₀₉₁ 为单面滑动块体,考虑渗流力后块体不再沿裂隙面滑出,而是被水流直接冲出,这也是实际工程中普遍存在的一种裂隙岩体失稳形式,对于这种被水流冲出而发生失稳的块体,将其定义为类自由脱落块体。由于渗流力的作用,坡面中会存在被水流直接冲出的类自由脱落块体,说明渗流力的增加会使块体出现新的失稳模式。

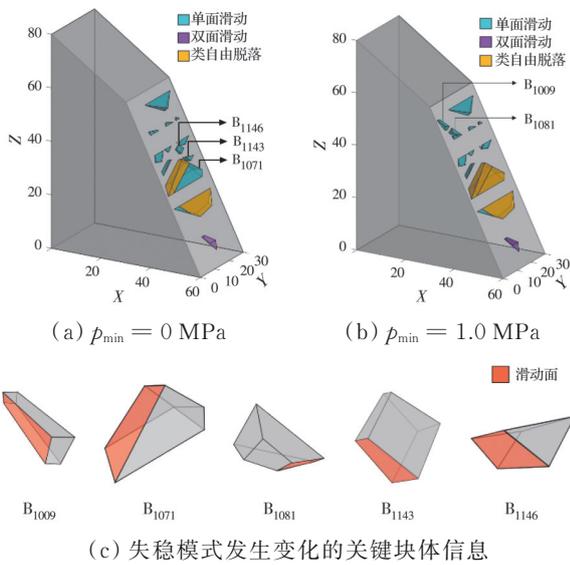


图 8 不同渗流压力边界条件下关键块体显示
 Fig. 8 Display of key blocks with different seepage pressure boundary conditions

图 8(c) 为两种不同渗流压力条件下失稳模式发生变化的关键块体形状和编号。对比图 8(a) 和 (b), 并结合图 8(c) 同样发现: 1) 渗流力的增加会降低块体的稳定性, 当渗流力较小时 (p_{min} = 0 MPa、p_{max} = 0.8 MPa), 块体 B₁₀₀₉ 和块体 B₁₀₈₁ 均属于稳定块体, 当渗流力较大时 (p_{min} = 1.0 MPa、p_{max} = 1.8 MPa), 上述两个块体均属于沿单面滑动的失稳块体; 2) 渗流力的增加会提高部分块体的稳定性, 当渗流力较小时, 块体 B₁₁₄₃ 和块体 B₁₁₄₆ 均属于沿单面滑动的块体, 当增加渗流力时 (p_{min} = 1.0 MPa、p_{max} = 1.8 MPa), 上述两个块体均变为稳定块体, 分析其原因同样是渗流力的增加提高了其抗滑力和稳定性; 3) 渗流力的增加会使部分块体出现类自由脱落的现象, 例如, 当渗流力较小时, 块体 B₁₀₇₁ 属于单面滑动模式, 增加渗流力, 该块体变为类自由脱落关键块体。

为定量研究渗流力对块体稳定性的影响, 图 9

给出了不同渗流力条件下满足条件的每个关键块体的详细安全系数, 并根据每个关键块体的安全系数定义了边坡整体安全系数 I_s。其含义为每个关键块体安全系数按照体积加权平均得到的整体安全系数, 用以评价边坡整体的稳定性, 其计算公式为

$$I_s = \sum_{k=1}^n \frac{F_{sk} V_k}{V} \quad (10)$$

式中: k 为块体的编号; n 为块体的总数量; F_{sk} 为块体 k 的安全系数; V_k 为块体 k 的体积; V 为全部关键块体的体积和。

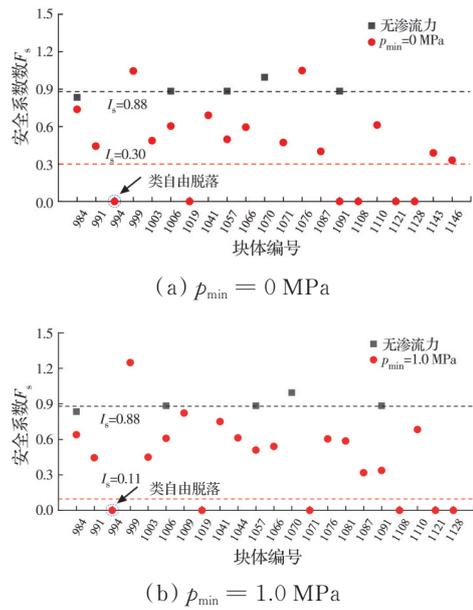


图 9 不同渗流压力边界条件下块体的安全系数 F_s
 Fig. 9 Safety factor F_s of block under different seepage pressure boundary conditions

从图 9 可以看出, 不考虑渗流力, 关键块体个数为 5, 边坡整体安全系数为 0.88; 当考虑渗流力时 (p_{min} = 0 MPa、p_{max} = 0.8 MPa), 关键块体的个数为 20, 边坡整体安全系数为 0.30; 当继续增加渗流力时 (p_{min} = 1.0 MPa、p_{max} = 1.8 MPa), 关键块体的个数为 21, 边坡整体安全系数为 0.11。可见渗流力的增加, 边坡失稳块体个数增加, 边坡的整体稳定性变差。

当考虑结构面黏聚力 c 时, 相同渗流压力边界条件下计算得到的关键块体如图 10 所示。对比图 10 和图 8 可知, 结构面黏聚力 c 的存在会降低关键块体的数量, 提高块体的稳定性。但相同渗流力下, 无论是否考虑结构面黏聚力, 关键块体的失稳模式并不会因黏聚力的改变而发生变化。

2.2.3 结构面水弱化作用的影响

假设结构面黏聚力的水弱化率 α = 0.2, 计算得到的不同渗流力条件下水弱化后的结构面黏聚力 c 参数云图如图 11 所示。

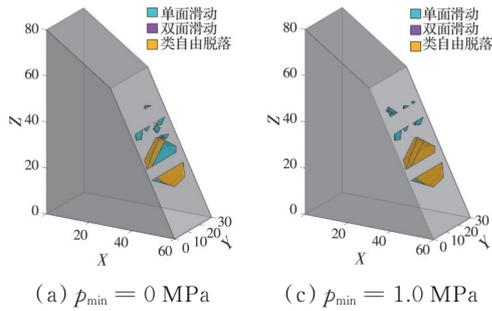


图 10 不同渗流压力边界条件关键块体

Fig. 10 Key blocks with different seepage pressure boundary conditions

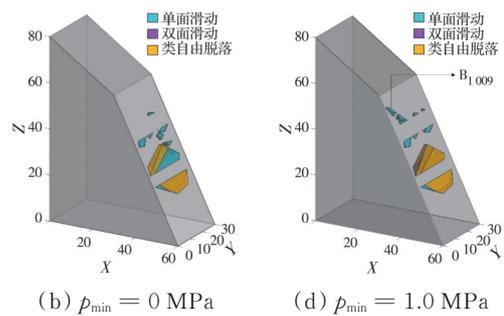


图 12 结构面水弱化后存在的关键块体

Fig. 12 The key blocks existing after structural surface water weakening

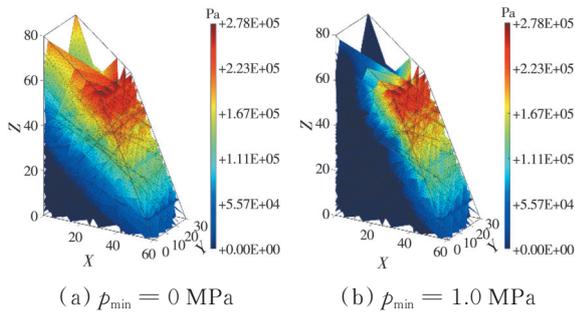


图 11 结构面水弱化后黏聚力 c 分布云图

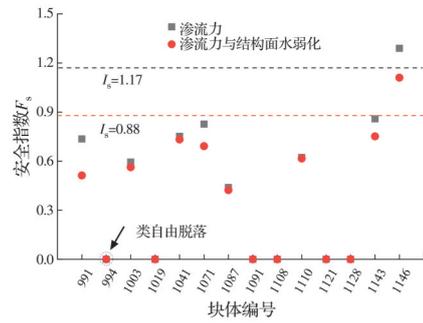
Fig. 11 Distribution cloud chart of c of cohesive force after structural surface water weakening

从图 11 可以看出,当渗流力较小时,坡面上的渗流力也比较小,块体结构面黏聚力会弱化,但并未完全丧失;当渗流力较大时,边坡内部渗流力较大的地方,块体结构面黏聚力会完全丧失。

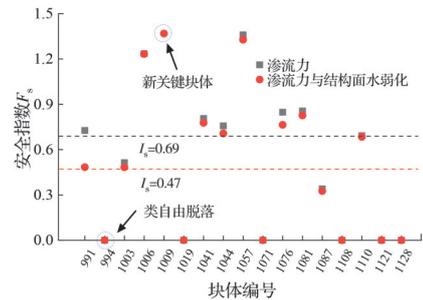
采用弱化后的黏聚力 c 计算块体的安全系数 F_s , 计算得到的满足条件的关键块体如图 12 所示。对比图 12 和图 10 可以发现,当渗流力较小时结构面黏聚力 c 的水弱化程度也比较小,只考虑渗流力与同时考虑渗流力和结构面水弱化作用下的关键块体完全相同;当渗流力较大时,结构面黏聚力 c 的水弱化程度也相对较大,部分块体的稳定性会发生变化,例如,仅考虑渗流作用,块体 B_{1009} 安全系数大于 1.5,属于稳定块体,当考虑结构面水弱化作用之后,其安全系数小于 1.5,属于沿单面下滑的失稳块体。但是结构面水弱化作用对边坡稳定性作用方式与渗流力不同,结构面水弱化作用会改变块体的稳定性,但并不会改变失稳块体的失稳模式。

为分析结构面水弱化作用对边坡整体安全性的影响,图 13 给出了不同渗流压力边界条件下的每个关键块体安全系数以及边坡整体安全系数 I_s 。

从图 13 可以看出,当渗流力较小时,只考虑渗流力的作用(含黏聚力),边坡的整体安全系数为 1.17,当同时考虑渗流力和结构面水弱化时,边坡的整体安全系数会显著降低,为 0.88,降低比率为



(a) $p_{\min} = 0 \text{ MPa}$



(b) $p_{\min} = 1.0 \text{ MPa}$

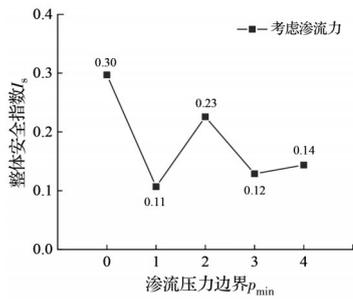
图 13 不同渗流压力边界条件下块体安全系数 F_s 变化
Fig. 13 The variation of block safety factor F_s under different pressure boundary of cohesive force c was considered

25%;当渗流力较大时,只考虑渗流力的作用(含黏聚力),边坡的整体安全系数为 0.69,当同时考虑渗流力和结构面水弱化时,边坡的整体安全系数会进一步降低,为 0.47,降低比率为 32%。可知,渗流力越大,结构面水弱化作用程度越高,边坡整体稳定性降低程度越高。

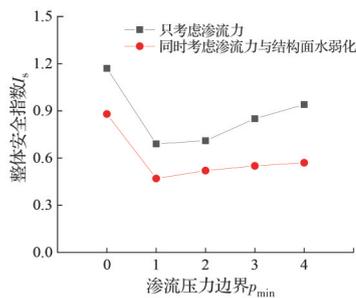
2.2.4 不同渗流压力边界条件下边坡整体稳定性

在上述研究的基础上,分别计算不同渗流压力边界条件下的边坡整体安全系数, p_{\min} 分别为 0、1.0、2.0、3.0、4.0 MPa,结构面的初始黏聚力和黏聚力水弱化率同上述一样。计算得到的不同渗流压力边界条件下,边坡整体安全系数 I_s 如图 14 所示。其中,图 14(a)为不考虑黏聚力条件下的边坡整体安全系数,图 14(b)为考虑渗流力和结构面水

弱化作用下的边坡整体安全系数。



(a) 不考虑黏聚力 c



(b) 考虑黏聚力 c

图14 有无黏聚力 c 情况下整体安全指数 I_s 与不同压力边界关系

Fig. 14 Relationship between average safety index I_s and different pressure boundary with or without cohesive force c

从图14可以看出, 无论是否考虑结构面黏聚力, 边坡整体安全系数并不随渗流力的增加而呈现出单调降低的情况, 而是存在一个最危险渗流力值, 在该渗流力条件下, 边坡的整体稳定性最差, 当低于或高于该渗流力, 边坡的整体稳定性均较之有所提高。最危险渗流力的值大小的确定只和渗流力的大小有关, 与结构面是否存在黏聚力以及黏聚力大小并无关系。对于该算例, 最危险渗流力边界值为1.0 MPa。经分析, 之所以会出现这种现象是因为渗流力的存在会改变块体所受合力大小和方向, 当渗流力较大时会改变部分块体的滑移面或稳定状态, 甚至部分块体会出现稳定性提高的情况, 从而出现渗流力增大, 边坡整体稳定性提高的现象。

3 结论

基于关键块体理论, 精细化考虑渗流力和结构面水弱化作用对裂隙岩体块体稳定性的影响。其中, 渗流力基于渗流理论和统一管网法计算, 结构面水弱化根据经验公式确定, 建立了一种考虑渗流作用的裂隙岩体块体稳定性分析方法。采用该方法对渗流作用下的某裂隙岩体边坡块体稳定性进行研究。主要结论如下:

1) 渗流力会改变块体主动力合力的方向与大

小, 进而改变块体的运动模式或失稳滑移面。通常, 渗流力会降低块体的安全系数, 使工程岩体中出现更多的关键块体, 但对部分裂隙岩体, 渗流力的存在也会提高其稳定性。

2) 渗流力与结构面水弱化作用对裂隙岩体边坡稳定性的作用方式不同, 渗流力会改变块体的抗滑力和滑动力, 因此, 渗流力的增加会使块体表现出更复杂的变化, 包括改变块体的稳定状态、块体的滑移面、块体的失稳形式; 结构面的水弱化只会降低块体的稳定性, 不会改变失稳块体的失稳形式。

3) 边坡的整体稳定性并不随渗流力的增加而呈现出单调降低的情况, 而是存在一个最危险渗流力值。针对某一具体边坡, 最危险渗流力值的确定只和渗流力的大小有关, 与结构面的黏聚力和黏聚力的水弱化程度无关。

综上, 裂隙渗流对边坡的稳定性有重要影响。建立考虑渗流作用的裂隙岩体块体稳定性分析方法具有重要的工程价值和理论意义, 该研究为裂隙岩体稳定性分析提供了新的思路和方法。

参考文献

- [1] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉. 岩体表征单元体与岩体力学参数[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1135-1142.
ZHOU C B, CHEN Y F, JIANG Q H. Representative elementary volume and mechanical parameters of fractured rock masses [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1135-1142. (in Chinese)
- [2] 周志芳. 裂隙介质水动力学原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
ZHOU Z F. Theory on dynamics of fluids in fracture medium [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)
- [3] 杨世豪, 苏立君, 张崇磊, 等. 强降雨作用下昔格达边坡渗流特性及稳定性分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(4): 19-27.
YANG S H, SU L J, ZHANG C L, et al. Analysis of seepage characteristics and stability of Xigeda Formation slope under heavy rainfall [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(4): 19-27. (in Chinese)
- [4] 李丞, 蔡立明, 张伟锋, 等. 初始渗流场对渣土场边坡降雨入渗特征及其稳定性的影响[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 1-9.
LI C, CAI L M, ZHANG W F, et al. Influence of initial seepage field on rainfall infiltration characteristics and stability of municipal solid waste landfill [J]. Journal

- of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 1-9. (in Chinese)
- [5] 张奇华, 邬爱清, 石根华. 关键块体理论在百色水利枢纽地下厂房岩体稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2609-2614.
ZHANG Q H, WU A Q, SHI G H. Application of key block theory to analysis of rock stability for underground plant in Baise hydraulic project [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2609-2614. (in Chinese)
- [6] WU W, ZHU H H, LIN J S, et al. Tunnel stability assessment by 3D DDA-key block analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71(Jan.): 210-214.
- [7] LIN J Y, ZUO Y J, WANG J, et al. Stability analysis of underground surrounding rock mass based on block theory [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(10): 3040-3052.
- [8] 石根华. 岩体稳定分析的赤平投影方法[J]. 中国科学, 1977, 7(3): 260-271.
SHI G H. Stereographic projection method for rock mass stability analysis [J]. Scientia Sinica, 1977, 7(3): 260-271. (in Chinese)
- [9] GOODMAN R E, SHI G H. Block theory and its application to rock engineering [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1985.
- [10] 许强, 黄润秋, 巨能攀, 等. 边坡岩体块体稳定性分析系统的开发与研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 408-413.
XU Q, HUANG R Q, JU N P, et al. Development and study of stability analysis system of slope blocks [J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(4): 408-413. (in Chinese)
- [11] 邬爱清, 朱虹, 李信广. 一种考虑块体侧面一般水压分布模式下的块体稳定性计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(Sup1): 936-940.
WU A Q, ZHU H, LI X G. A method for block stability analysis considering a general water pressure distribution model acting on the block surfaces [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Sup1): 936-940. (in Chinese)
- [12] 邬爱清. 基于关键块体理论的岩体稳定性分析方法及其在三峡工程中的应用[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(2): 1-7.
WU A Q. Series methods of analyzing rock mass stability based on key block theory and their applications to Three Gorges project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(2): 1-7. (in Chinese)
- [13] 商开卫, 秦宏浩, 窦灿. 块体理论在拱坝坝肩边坡抗滑稳定性分析中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2011(4): 110-114.
SHANG K W, QIN H H, DOU C. An analysis of the stability of arch dam abutment slope by the block theory [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(4): 110-114. (in Chinese)
- [14] 徐栋栋, 郑宏, 邬爱清, 等. 岩体渗流及参数敏感性对块体稳定性影响研究[J]. 计算力学学报, 2013, 30(Sup1): 168-173.
XU D D, ZHENG H, WU A Q, et al. Effects of seepage in fractured rock and parameter sensitivity on the block stability [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2013, 30(Sup1): 168-173. (in Chinese)
- [15] 高剑锋, 白明洲, 穆树怀, 等. 基于三维激光扫描的高陡边坡块体稳定性研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(Sup2): 77-81.
GAO J F, BAI M Z, MU S H, et al. Study on high and steep slope stability Based on 3D laser scanning [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(Sup2): 77-81. (in Chinese)
- [16] 黄岫, 赵引, 任青文. 多组结构面切割下水工隧洞关键块体可视化研究[J]. 能源与环保, 2018, 40(3): 40-43.
HUANG S, ZHAO Y, REN Q W. Visualization research on key blocks of tunnel in multi parallel fracture cutting [J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(3): 40-43. (in Chinese)
- [17] 李伟, 肖蓉, 吴礼舟. 岩质边坡中结构面上水压分布假设的改进研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 599-608.
LI W, XIAO R, WU L Z. Improvement of water pressure distribution along the structural plane in rock slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 599-608. (in Chinese)
- [18] 杨宝全, 张林, 徐进, 等. 高拱坝坝肩软岩及结构面强度参数水岩耦合弱化效应试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(2): 21-27, 35.
YANG B Q, ZHANG L, XU J, et al. Experimental study of weakening effect of water-rock coupling interaction on strength parameters of dam abutment weak rock and structural plane for high arch dam [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2015, 47(2): 21-27, 35. (in Chinese)
- [19] 杨宝全, 张林, 陈媛, 等. 锦屏一级高拱坝坝基结构面弱化效应研究及坝肩稳定性分析[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 907-915.
YANG B Q, ZHANG L, CHEN Y, et al. Study on weakening effect of structural plane and stability analysis of Jinping I high arch dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(7): 907-915. (in Chinese)
- [20] 张峰瑞, 姜谔男, 杨秀荣. 孔隙水压力对锯齿状结构面剪切蠕变特性的影响[J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 2901-2912.

- ZHANG F R, JIANG A N, YANG X R. Effect of pore water pressure on shear creep characteristics of serrate structural plane [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41 (9): 2901-2912. (in Chinese)
- [21] REN F, MA G W, WANG Y, et al. Pipe network model for unconfined seepage analysis in fractured rock masses [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 88: 183-196.
- [22] MA G W, WANG H D, FAN L F, et al. Segmented two-phase flow analysis in fractured geological medium based on the numerical manifold method [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 121: 112-129.
- [23] MA G W, WANG Y, LI T, et al. A mesh mapping method for simulating stress-dependent permeability of three-dimensional discrete fracture networks in rocks [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 108: 95-106.
- [24] SUN Z Z, YAN X, HAN W Q, et al. Simulating the filtration effects of cement-grout in fractured porous media with the 3D unified pipe-network method [J]. *Processes*, 2019, 7(1): 46.
- [25] MA G W, LI T, WANG Y, et al. Numerical simulations of nuclide migration in highly fractured rock masses by the unified pipe-network method [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 111: 261-276.

(编辑 胡玲)