

胡晓明. 高速公路桥梁岩溶地基应力应变响应机制[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2024, 39(3):70-77. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.009

HU X M. On the Stress-strain Response Mechanism of Karst Foundation of Highway Bridges [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 39(3):70-77. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.03.009

高速公路桥梁岩溶地基应力应变响应机制

胡晓明*

(中国煤炭地质总局 湖北煤炭地质局, 湖北 武汉 430070)

摘要: 贵州高速公路桥梁具有跨度大、高度高、荷载大等显著特点, 为了研究喀斯特地区高速公路桥梁复杂岩溶地基破坏模式, 利用离散元数值模拟法模拟串溶和鹰嘴岩现象桥梁岩溶地基应力应变响应机制. 以桐新高速第2标段芭蕉湾特大桥左幅4c-2桩基的串溶现象、枇杷洞大桥右幅6-0鹰嘴岩现象为案例, 通过主动式声呐系统探测桥梁桩基下岩溶的空间位置和分布, 并利用离散单元法进行数学建模, 然后通过PFC颗粒流软件进行加载过程应变应力响应机制进行模拟分析, 最后利用结构近似分析法对模拟结果进行验证分析. 分析表明: 芭蕉湾特大桥桩底在0.68, 1.73 m处分布了2个高度为0.62, 1.03 m的溶洞情况下, 在设计荷载27 000 kN作用下, 地基会出现挤压隆起和碎裂形成的整体破坏模式; 枇杷洞大桥右幅6-0桩底在桩底鹰嘴岩现象时, 在设计荷载18 000 kN作用下, 会存在地基地层挤压碎裂和桩基不均匀沉降, 从而导致地基破坏和失稳的局部剪切破坏模式. 并且, 根据结构近似分析法, 虽然2个工点岩溶洞室的厚跨比大于0.5满足理论要求, 但是其抗弯和抗剪验算均未通过, 因此, 判定其在桥梁设计荷载作用下, 地基不稳定. 通过模拟分析和理论计算分析结论, 为桐新高速岩溶地基处理提供数据支撑和决策依据.

关键词: 桥梁桩基; 岩溶地基; 串溶现象; 鹰嘴岩现象; 数值模拟

中图分类号: TU449

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)03-0070-08

On the Stress-strain Response Mechanism of Karst Foundation of Highway Bridges

HU Xiaoming

(Hubei Provincial Administration of Coal Geology, China National Administration of Coal Geology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Guizhou expressway bridges are featured by large span, high height and high load. In order to study the complex karst foundation failure mode of expressway bridges in karst areas, the discrete element numerical simulation method is used to simulate the stress-strain response mechanism of bridge karst foundation under the phenomena of series dissolution and olecranon rock. The project takes the cross dissolution phenomenon of the 4c-2pile foundation on the left side of the Bajiaowan Extra Large Bridge in the second section of the Tongxin Expressway and the 6-0 olecranon rock phenomenon on the right side of the Pipaodong Bridge as case studies. By using an active sonar system to detect the spatial position and distribution of karst under the bridge pile foundation, and using the discrete element method for mathematical modeling, the PFC particle flow software is used to simulate and analyze the strain stress response mechanism during the loading process. Finally, the structural approximation analysis method is used to verify and analyze the simulation results. Analysis results show that under the condition of two karst caves with heights of 0.62 m and 1.03 m distributed at 0.68 m and 1.73 m

收稿日期: 2024-08-19

* 通信作者, E-mail: 451601451@qq.com

respectively at the bottom of the pile of the Bajiaowan Grand Bridge, the foundation will exhibit an overall failure mode of compression uplift and fragmentation under the design load of 2 7000 kN. When the bottom of the 6-0 pile on the right side of the Loquat Cave Bridge is exposed to the phenomenon of eagle beak rock at the bottom of the pile, under the design load of 18 000 kN, there will be local shear failure modes such as ground layer compression fragmentation and uneven settlement of the pile foundation, leading to foundation failure and instability. According to the structural approximation analysis method, although the thickness to span ratio of the two rock cave chambers at the construction site is greater than 0.5, which meets the theoretical requirements, their bending and shear resistance calculations have not passed. Therefore, it is determined that the foundation is unstable under the design load of the bridge. It has provided data support and decision-making basis for the karst foundation treatment of Tongxin Expressway through simulation analysis and theoretical calculation analysis conclusions.

Keywords: bridge pile foundation; karst foundation; series dissolution phenomenon; eagle beak rock phenomenon; numerical simulation

贵州是我国典型的喀斯特高原地形地貌,已建成公路 20 余万 km,高速公路通车里程超过 8 000 km,已建和在建桥梁近 3 万座.世界前 100 名高桥近半数在贵州,囊括几乎所有桥型,是名副其实的“桥梁博物馆”.而喀斯特高原地形地貌,岩溶地基是一种复杂地基,常常引起地基承载力不足、不均匀沉降、地基滑动和塌陷等地基变形破坏,易导致严重的工程事故,因此,对具有跨度大、高度高、荷载大等显著特点的贵州高速公路桥梁建设,岩溶地基的稳定性评估是保证桥梁质量和后期安全运营的最重要工作内容之一.

岩溶地基稳定性评估一般采用现场原位测试或数值模拟分析法,而对具有跨度大、高度高、荷载大等显著特点的贵州高速公路桥梁,因地形地质条件因素导致其原位测试方法成本极其高昂,效率较为低下.由于岩石是具有不均匀性和各向异性的非连续体,利用离散元法能够研究岩溶裂隙及孔洞等微观结构对宏观力学行为的影响.

美国工程师 P. Cundall 和 O. Strack(1977 年)在 *A discrete numerical model for granular assemblies* 首次提出利用离散元法(Discrete Element Method, DEM)解决非连续介质力学问题数值模拟法.

离散元法理论是把研究对象离散为 N 个大小不同的颗粒,每个颗粒为 1 个单元,然后根据受力情况,研究每个单元的加速度、速度和位移等运动信息,达到模拟追踪物料运移过程^[1],如图 1 所示.

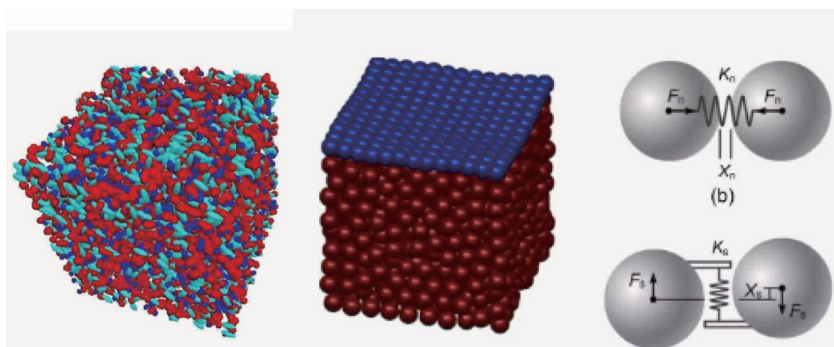


图 1 PFC 建模过程

随着离散元法在岩体力学模拟中的广泛应用,我国许多学者开展了岩体的离散元法研究.胡波等^[2]利用离散元软件 PFC^{2D}建立了节理岩体直剪试验模型,并将直剪试验模拟结果与断续节理模型试验结果进行对比分析,发现剪切过程中的剪胀效应使岩桥承担了更多的压应力,使岩桥的抗剪强度增大,并依据破坏机制将断续节理岩体整个直剪过程分为线弹性阶段、初裂阶段、峰值阶段、峰后阶段及残余阶段 5 个阶段;常明丰等^[3]利用离散元法模拟含有岩溶洞穴的地基加固前后变形的规律,并利用现场测试进行了验证;李耀琨^[4]利用有限差分-离散元(FDM-DEM)耦合计算方法和现场试验方法,对粤北 5 个典型岩溶场地高层建筑项目开展地基稳定性研究;王廷伯等^[5]利用 PFC^{2D}模拟开展了岩溶空洞特征和稳定性研究,为

岩溶隧道工程设计和施工提供借鉴与参考;HE等^[6]利用离散元法和 UDEC 软件模拟了薄石灰岩地层岩溶洞穴的稳定性及抗水层中渗流场和位移场的变化规律;GIESE等^[7]利用离散元法模拟通道-连续介质模型模拟了岩溶通道渗流机制;徐明等^[8]利用离散元法研究了 FAST(500 m 口径球面射电望远镜)岩溶洼地工程地质条件,提出岩溶发育超高岩质边坡的破坏模式;陈梓华^[9]利用 PFC 对灰岩裂纹扩展机制进行研究,从而模拟岩溶发育的作用机制;屈若枫等^[10]利用离散元法和颗粒流 PFC 模拟了武汉岩溶区地铁建设地基塌陷特征和机理,并通过室内试验进行了对比验证分析,系统地研究岩溶灾害破坏机理和微观力学特征;WANG等^[11]利用离散元法和 MatDEM 软件模拟了岩溶水位和岩溶塌陷关系.综上所述表明:利用离散元法研究岩溶地基稳定性文献相对较少,并且对其地基破坏机制研究匮乏.

鉴于基于 PFC 的数值分析不仅能够刻画岩溶构造裂隙和孔隙,也能够从微观上试验地基的稳定性,课题分别以桐新高速第 2 标段芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基的串溶现象、枇杷洞大桥右幅 6-0 鹰嘴岩现象为案例,进行了地基稳定性分析,并且通过分析其应力应变响应机制,研究其不同岩溶现象下地基破坏机制,为岩溶地基处理提供数据支撑和决策依据.

1 串溶现象的岩溶地基稳定性评估

课题串溶现象以桐新高速第 2 标段芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基测试结果为案例.

1.1 离散元法基本方程

1.1.1 颗粒离散元的力—位移方程

颗粒离散元的力—位移方程表达了颗粒单元的相对位移和相邻单元接触力之间的关系,函数关系为

$$F_n = k_n u_n. \quad (1)$$

式中: F_n 为颗粒单元之间的法向接触力; k_n 为颗粒单元之间法向接触刚度; u_n 为颗粒单元之间的法向相对位移.

$$\Delta F_s = k_s \Delta u_s. \quad (2)$$

式中: ΔF_s 为颗粒单元之间的切向剪力增量; k_s 为颗粒单元之间切向接触刚度; Δu_s 为颗粒单元之间的切向相对位移.

1.1.2 颗粒离散元的运动方程

颗粒离散元的运动方法表达了离散元空间内每个颗粒单元的平动和转动的运动关系.首先,通过作用于颗粒单元的不平衡力和不平衡力矩计算出颗粒单元的平动加速度和转动加速度;然后,依据计算出的加速度来计算 Δt 时间内的颗粒单元平动速度和转动速度以及平动位移和转动位移,其表达式为

$$\ddot{u}_x(t_0) = \frac{F_x}{m}; \quad (3)$$

$$\ddot{w}_x(t_0) = \frac{M_x}{I_x}. \quad (4)$$

在 $t_1 = t_0 + \frac{\Delta t}{2}$ 时间时,颗粒单元在 x 方向平动速度和转动速度分别为

$$\dot{u}_x(t_1) = \dot{u}_x(t_0) \frac{\Delta t}{2} + \ddot{u}_x(t_0) \Delta t; \quad (5)$$

$$w_x(t_1) = w_x(t_0) \frac{\Delta t}{2} + \dot{w}_x(t_0) \Delta t. \quad (6)$$

在 $t_2 = t_0 + \Delta t$ 时间时,颗粒单元在 x 方向位移为

$$u_x(t_2) = u_x(t_0) + \dot{u}_x(t_1) \Delta t. \quad (7)$$

式中: F_x 为 t_0 时作用于颗粒上的不平衡力在 x 方向的合力; M_x 为 t_0 时颗粒在作用于颗粒上的不平衡力矩在 x 方向的弯矩; m 为颗粒单元的质量; I_x 为颗粒单元的转动惯量.

1.2 PFC 模型及参数

开展离散元法和 PFC^{2D} 数值模拟程序对桥梁岩溶探测结果地基应力变形响应机制进行模拟分析,从

而实现桥梁地基稳定性分析.芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基设计荷载 27 000 kN,桩基直径 2.50 m,桩长 31.6 7 m,采用两桩一承台.在桩底存在 0.68,1.73 m 处分布 2 个高度为 0.62,1.03m 的溶洞,模拟参数见表 1,模型构建如图 2 所示.

表 1 PFC^{2D} 模拟桩底岩层颗粒相关细观参数取值

变形模量/Pa	刚度比	平行黏结变形模量/Pa	平行黏结刚度比	抗拉强度/kPa	内聚力/kPa	内摩擦角/(°)	胶结半径系数
2e9	1.3	2e9	1.3	1 000	100	35	1
5e9	1.3	5e9	1.3	5 000	500	42	1

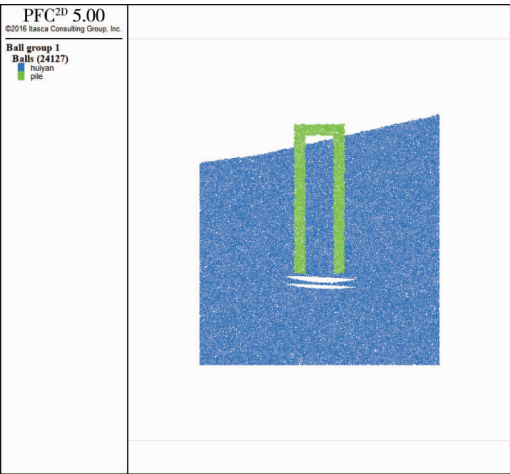


图 2 PFC 芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 模型

1.3 模型计算的边界条件

离散元法的 PFC^{2D} 数值模拟程序中边界条件的建立至关重要,决定了模型的外在约束和力的输入方式.其边界条件包括刚性边界与周期边界:刚性边界是指边界由墙体组成,墙体本身不能直接被施加外荷载,一般通过施加速度来控制墙体运动;周期性边界条件的作用是使边界应力连续和位移连续.

1.4 PFC 模拟计算结果和分析

通过离散元 PFC^{2D} 数值模拟程序对芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 检测岩溶和地基稳定性进行评估.图 3 为芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基破坏图,图 4 为芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基力链云图.根据计算结果图 3 和图 4 可知:芭蕉湾特大桥桩底在 0.68,1.73 m 处分布 2 个高度为 0.62,1.03 m 的溶洞情况下,根据荷载加载过程模拟结果表明斜坡地带串溶岩溶会出现碎裂变形和挤压隆起,按照地基破坏模式为发生整体破坏,从而导致地基失稳.

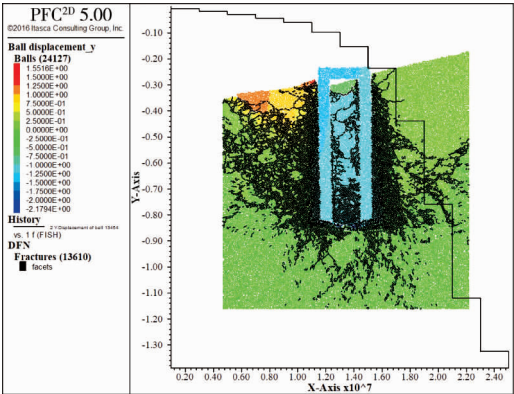


图 3 PFC 芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基破坏

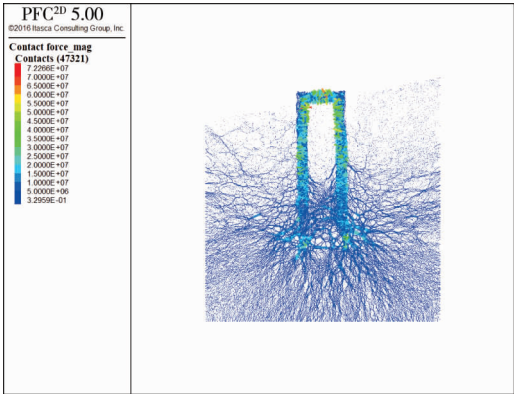


图 4 PFC 芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基力链云图

图 5 为芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基位移云图,图 6 为芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基裂隙云图.根据图 5 和图 6 可知:芭蕉湾特大桥桩底在 0.68,1.73 m 处分布 2 个高度为 0.62,1.03 m 的溶洞情况下,随着荷载

增加至设计荷载,地基会失稳.

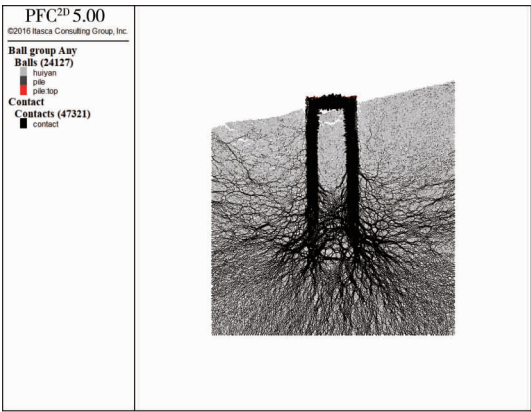


图 5 PFC 芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基位移云图

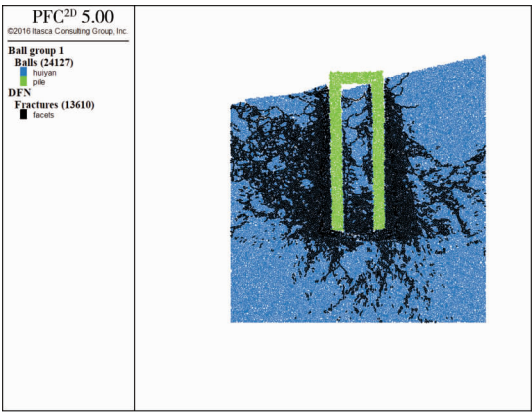


图 6 PFC 芭蕉湾特大桥左幅 4c-2 桩基裂隙云图

2 鹰嘴岩岩溶现象的岩溶地基稳定性评估

鹰嘴岩现象(沙和黏土填充)以桐新高速第 3 标段枇杷洞大桥右幅 6-0 测试结果为案例.

2.1 PFC 模型及参数

开展离散元法和 PFC^{2D}数值模拟程序对桥梁岩溶探测结果地基应力变形响应机制进行模拟分析,从而实现桥梁地基稳定性分析.枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基设计荷载 18 000 kN,桩基直径 2.40 m,桩长 37.67 m(原设计 8 m,因开挖存在鹰嘴岩岩溶现象施工加深至 37 m,鉴于探测 5 m 深度继续存在岩溶,设计变更为 4 根桩基抬一根桩基的地基处理方案),采用两桩一承台.在桩底的 8 m 处存在鹰嘴岩现象,模拟参数见表 2 和表 3,模型构建如图 7 所示.

表 2 PFC^{2D}模拟桩底岩层颗粒相关细观参数取值

平行黏结模型	变形模量/Pa	刚度比	黏结模量/Pa	黏结刚度比	内聚力/Pa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/Pa
桩	8e9	1.3	8e9	1.3	1e7	52	1e7
粉质黏土	1e9	1.6	1e9	1.6	1e6	30	1e6
灰岩	7e9	1.3	7e9	1.3	4e6	50	4e6

表 3 PFC^{2D}模拟桩底岩层颗粒相关细观参数取值(填充物沙)

线性模型	变形模量/Pa	刚度比	摩擦系数
填砂	5e8	1.7	0.5

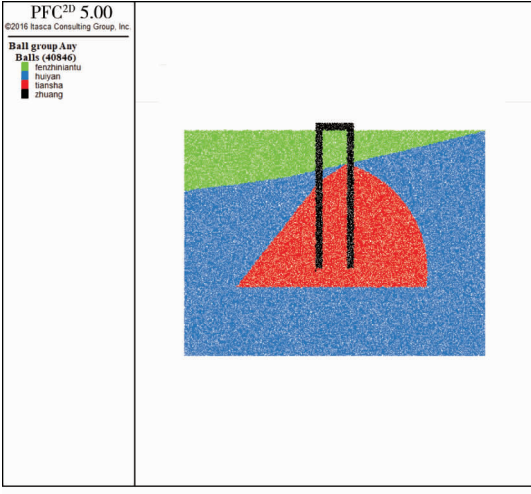


图 7 枇杷洞大桥右幅 6-0 模型

2.2 PFC 模拟计算结果和分析

通过离散元 PFC^{2D} 数值模拟程序对枇杷洞大桥右幅 6-0 岩溶地基进行稳定性评估。

图 8 为枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基破坏图(未达极限承载力),图 9 为枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基破坏图(极限承载力),图 10 为枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基位移云图,图 11 为枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基裂隙云图。根据计算结果图 8~图 11 可知:枇杷洞大桥右幅 6-0 桩底会存在地层挤压碎裂,从而导致地基和桥梁会存在失稳。

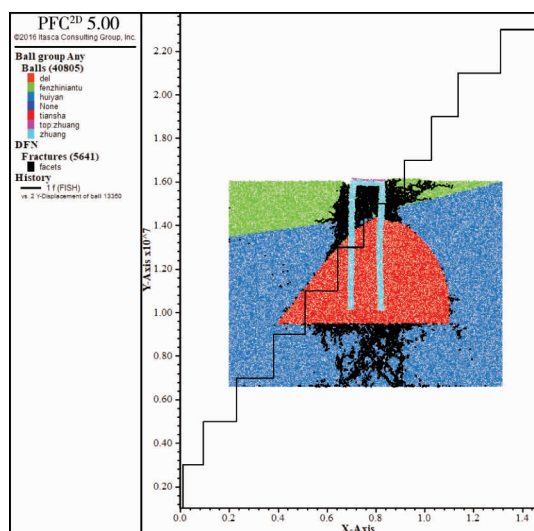


图 8 PFC 枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基破坏图(未达极限承载力)

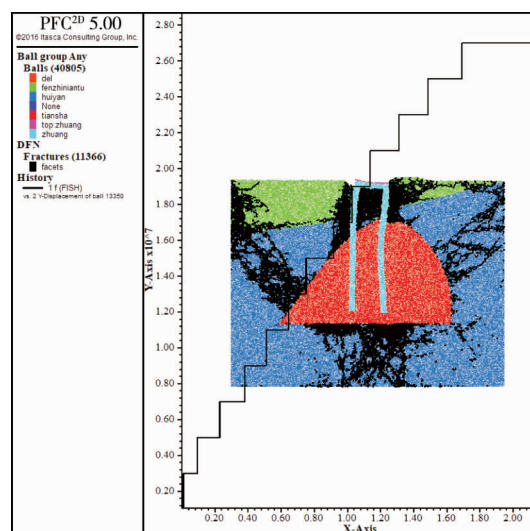


图 9 PFC 枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基破坏图(极限承载力)

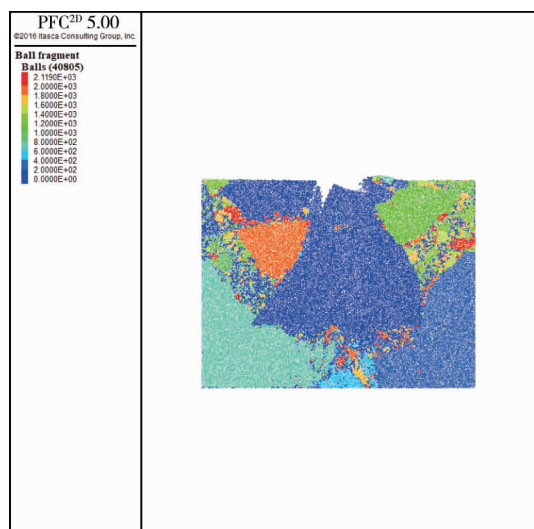


图 10 PFC 枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基位移云图

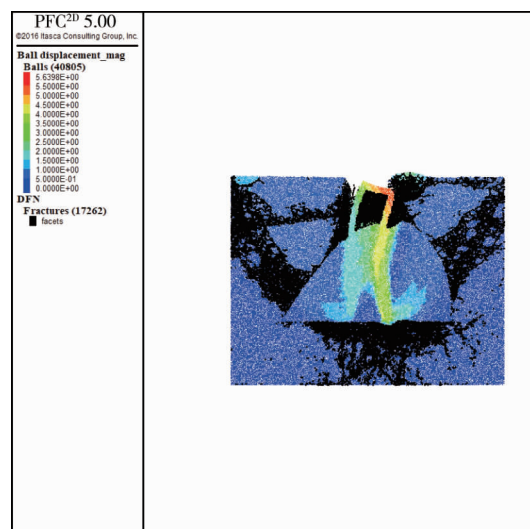


图 11 PFC 枇杷洞大桥右幅 6-0 桩基裂隙云图

3 基于结构力学近似分析法桥梁岩溶地基稳定性计算分析

结构近似分析法主要通过抗弯计算和抗剪计算来评估洞室顶板的稳定性。桥梁桩基岩溶顶板上覆岩层为整体较破碎~较完整的中厚层状灰岩,岩体抗压强度较高。桥梁桩基跨径较大,因此弯矩为洞室顶板破坏主要控制因素。

当洞室岩体质量等级为Ⅰ或Ⅱ时可按两端固定梁计算;当洞室岩体质量等级为Ⅲ或Ⅳ时,可按简支梁计算。根据顶板岩体状况,本场地按简支梁计算。

依据抗弯强度进行计算,需满足以下关系式:

$$\frac{6M}{bH^2} \leq \sigma \quad \text{即} \quad H \geq \sqrt{\frac{6M}{b\sigma}}. \quad (8)$$

依据抗剪强度进行计算,需满足以下关系式:

$$\frac{4Q}{H^2} \leq \tau \quad \text{即} \quad H \geq \sqrt{\frac{4Q}{\tau}}. \quad (9)$$

那么依据简支梁模型进行计算:

$$\text{那么集中荷载: } M = \frac{P_1 L}{4}; Q = \frac{P_1}{2}. \quad (10)$$

$$\text{而均布荷载: } M = \frac{(p_2 + p_3) L^2}{8}; Q = \frac{(p_2 + p_3) L}{2}. \quad (11)$$

根据设计要求,溶洞顶板荷载较大,考虑到桩底受力可认为均匀受力,故顶板受力按均布荷载计算.那么推导出抗弯抗剪验算公式为

$$H \geq L \sqrt{\frac{3(p_2 + p_3)}{4b\sigma}} = H_a; \quad (12)$$

$$H \geq \sqrt{\frac{2L(p_2 + p_3)}{\tau}} = H_a. \quad (13)$$

式中: H 为顶板厚度,m; L 为顶板跨度,m; p_2 为上覆土体自重, $p_2 = \gamma_2 h_2$,kN/m; p_3 为上覆岩体自重, $p_3 = \gamma_3 h_3$,kN/m; b 为梁板计算宽度,取1.0 m; σ 为岩体抗弯强度(取饱和抗压强度的1/8),kPa; τ 为岩体抗剪强度,kPa.

考虑桥梁桩基溶洞洞室的长期稳定性,当顶板厚度 H 大于2倍安全厚度 H_0 时,顶板可判定为稳定.计算结果见表4.

表4 串溶和鹰嘴岩溶洞现象结构近似算法成果表

溶洞	荷载				抗弯验算				抗剪验算				稳定性评价
	桥梁荷载/kN	顶板岩体厚度/m	自重/(kN/m)	总荷载/(kN/m)	溶洞跨度/L/m	弯矩计算/(kN·m)	岩体抗弯轻度/kPa	计算顶板稳定性最小厚度/m	支座处剪力/kN	岩体抗剪强度/kPa	计算顶板稳定性最小厚度/m	顶板厚跨比	
1	27 000	32.35	879.92	68 379.92	10	854 749	5 039	169.63	34 189.96	419.916 7	36.093 39	3.235	不稳定
2	27 000	33.4	908.48	68 408.48	10	855 106	5 039	169.70	34 204.24	419.916 7	36.100 93	3.340	不稳定
3	18 000	37.67	1 024.624	46 024.62	10	575 307.8	5 039	114.17	23 012.31	419.916 7	29.611 37	3.767	不稳定

根据表4可知:虽然溶洞的厚跨比均满足要求,但是因为桥梁桩基荷载较大,其岩层覆盖层厚度均不满足验算要求,因此在设计荷载作用下其地基不稳定,理论计算结果与模拟分析结果存在一致性.

4 结论

1) 芭蕉湾特大桥桩底存在0.68,1.73 m处分别分布2个高度为0.62,1.03 m的溶洞情况下,在设计荷载27 000 kN作用下,地基会出现挤压隆起和碎裂形成的整体破坏模式.

2) 枇杷洞大桥右幅6-0桩底在桩底鹰嘴岩现象时,在设计荷载18 000 kN作用下,会存在地基地层挤压碎裂和桩基不均匀沉降,从而导致地基破坏和失稳的局部剪切破坏模式.

3) 根据结构近似分析法,虽然2个工点岩溶洞室的厚跨比大于0.5满足理论要求,但是其抗弯和抗剪验算均未通过,因此判定其在桥梁设计荷载作用下,地基不稳定.

4) 通过模拟和理论计算分析结果,为这2个工点岩溶地基处理提供数据支撑和决策依据.

参考文献:

- [1] 张云毅, 吴玉鹏, 张可能, 等. 粗粒组对细粒类填土力学性质的影响分析[J]. 土工基础, 2019, 33(1): 39-43.
- [2] 胡波, 王思敬, 刘顺桂, 等. 基于精细结构描述及数值试验的节理岩体参数确定与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2458-2465.
- [3] 常明丰, 刘国柱, 刘勇. 路基溶洞加固的离散元方法数值模拟研究[J]. 路基工程, 2011, (2): 64-66.
- [4] 李耀琨. 岩溶地区高层建筑刚性桩复合地基-筏板基础体系的受力性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [5] 王廷伯, 宋瑞刚, 周秋爽. 基于 PFC 的岩溶空洞稳定性数值模拟分析[J]. 公路, 2017, 62(7): 330-334.
- [6] HE Z Y, GUO J Q, CHEN F. Dynamic evolution of the fractures and hydraulic pressures in water-resistant strata between Karst cavity and tunnel based on discrete element method [C]//Proceedings of the 2017 3rd International Forum on Energy, Environment Science and Materials (IFEESM 2017). Paris, France: Atlantis Press, 2018.
- [7] GIESE M, REIMANN T, BAILLY-COMTE V, et al. Turbulent and laminar flow in Karst conduits under unsteady flow conditions: interpretation of pumping tests by discrete conduit-continuum modeling[J]. Water Resources Research, 2018, 54(3): 1918-1933.
- [8] 徐明, 宋二祥, 沈志平, 等. FAST 大型岩溶洼地场地岩土治理关键技术研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(3): 87-99.
- [9] 陈梓华. 基于离散元平直节理接触模型灰岩微裂纹扩展研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [10] 屈若枫, 彭圣刚, 周志鹏. 地铁穿越岩溶区地表塌陷特征及微观力学试验研究[J]. 土工基础, 2022, 36(4): 635-639.
- [11] WANG W X, XIA Y. Modelling the evolution of overlying Karst collapse based on the discrete element method [C]//2023 International Conference on Algorithms, Computing and Data Processing (ACDP). IEEE, 2023: 126-130.