

赵桂清, 张吉禄, 周小涵, 等. 岩溶区桥桩承载特性及溶洞变形机理研究[J]. 中国岩溶, 2024, 43(5): 1133-1143.

DOI: 10.11932/karst20240510

岩溶区桥桩承载特性及溶洞变形机理研究

赵桂清¹, 张吉禄^{2,3}, 周小涵^{2,3}, 刘新荣^{2,3}, 刘馨琳^{2,3}, 郭宏青¹

(1. 中国水利水电第十四工程局有限公司, 云南昆明 650041; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;
3. 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心(重庆), 重庆 400045)

摘要:为明确岩溶区桥梁建设过程中溶洞对桥桩承载特性的影响机理,以贵州某高速公路项目高架桥桩为依托,采用数值模拟的方法研究桥桩整体穿越溶洞、侧穿溶洞以及临近溶洞情况下桩基承载能力、桩身荷载传递规律以及溶洞稳定性。结果表明:(1)当桥桩穿越溶洞时,桥桩承载能力随溶洞埋深增加而降低,文中工况下承载力最大衰减量为16.5%~17.5%,而当桥桩临近溶洞时,溶洞对桥桩的影响随距离增加而减小,且当水平距离大于2D后(D为桩身直径)影响可忽略不计;(2)当溶洞位于桩身嵌岩段上部且桥桩侧穿溶洞或桥桩临近溶洞不足1D时,桥桩将产生较大差异沉降,进而影响上部结构稳定性;(3)溶洞的存在主要影响桩基临空段侧阻力的发挥,而对其他位置侧阻力的发挥影响不大,且溶洞对端阻力影响程度排序为:桥桩整体穿越溶洞>桥桩侧穿溶洞>桥桩临近溶洞;(4)桥桩整体穿越、侧穿以及临近溶洞引起的溶洞潜在破坏模式分别为顶板拉伸破坏、桩基位置附近剪切破坏以及承台的冲切破坏。

关键词:桥桩; 溶洞; 承载特性; 稳定性; 岩溶区

创新点:(1)溶洞对桥桩承载力有削弱作用,桩基穿越溶洞的影响要大于临近溶洞。(2)溶洞非对称分布使其产生差异沉降,溶洞埋深越浅或距离越近则影响越大。(3)溶洞对端阻力影响排序:整体穿越溶洞>侧穿溶洞>临近溶洞

中图分类号: TU443.1; P642.25 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2024)05-1133-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

伴随着中西部崛起以及交通一体化,我国公路网建设得到迅猛发展。公路工程建设过程中难免穿越诸多复杂地形。在我国西南地区,地势起伏较大,地质条件复杂,公路建设常以高架路桥等方式建设,且当地喀斯特地貌分布广泛,地下溶洞发育,桥桩不可避免穿越溶洞发育区。岩溶作用使岩体结构发生改变,导致岩土体强度降低、渗透性增强,且不同溶洞与桩基位置关系也会对地基承载力及稳定性产生

显著影响,进一步可引起地层剧烈变形,建筑倾斜、倒塌等灾害^[1-3],为相关工程建设带来极大挑战。

对于上述问题,国内外诸多学者基于成熟的地质探测技术^[4-5],针对桩基与溶洞的相互作用关系展开了系列研究,并取得了丰富成果。相关研究最早是针对高层建筑基础展开的200 MN荷载破坏试验,实验过程中石灰岩被基础穿透发生冲切破坏^[6]。其后众多学者也开展了相关实验研究,其中冯明伟^[7]按照溶洞与桩基的位置关系,将岩溶区地基模式划分为三类:嵌入单个较大溶洞顶板的桩基、贯穿一个

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(52104076)

第一作者简介:赵桂清(1978—),男,工程师,主要从事道路桥梁方面的施工技术与工程管理。E-mail: 512935371@qq.com。

通信作者:张吉禄(1993—),男,博士研究生,主要从事岩土工程与桩基础方面的研究与设计工作。E-mail: 540726390@qq.com。

收稿日期:2023-01-01

照充足,雨量充沛,无霜期长,雨热基本同季,年平均降水 1249.3 mm,年最大降水量 1458.5 mm。

地下水类型为第四系松散孔隙水、基岩裂隙水及岩溶裂隙水,松散孔隙水以上层滞水形式赋存;基岩裂隙水赋存于石英砂岩、粉砂质灰岩及灰岩风化层节理裂隙中;岩溶裂隙水赋存于灰岩、白云岩溶蚀裂隙中。

1.4 溶洞发育概况

经地质勘探以及现场施工作业人员反映,建设区域内零星分布有规模不等溶洞,部分溶洞高度较高,且跨度较大使桥桩基础孔洞相互贯通,另有部分溶洞出现在桩孔一侧,使灌浆过程中出现漏浆现象,现场经回填片石或采用钢套筒护臂法完成桩基浇筑,但是溶洞对基础的影响仍未彻底消除,具体溶洞发育情况如图 1。

2 数值模拟

2.1 模型建立

本文采用 ABAQUS 软件,基于刘士锋^[13]等研究成果,充分考虑边界条件对计算结果的影响,选取桩周土体计算域大于桩径 10 倍的圆柱形三维实体模型进行计算分析,土体模型尺寸为 50 m(半径)×80 m(深度),桥桩基础分承台与桩基两部分,选取本案例典型尺寸进行分析,其中承台为 10.45 m(长)×3 m(宽)×3 m(高),桩基尺寸为 1 m(半径)×26 m(桩长);根据地勘资料及现场勘查,溶洞可大致描述为长轴 15 m、短轴 5 m 的椭球体空腔;模型采用结构化网格与扫略网格相结合的划分方法,计算模型如图 3。

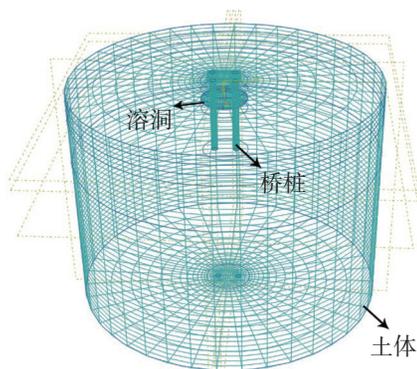


图 3 数值计算模型

Fig. 3 Model of numerical calculation

2.2 计算参数选取

计算模型岩土体采用摩尔-库伦弹塑性准则,桥桩为完全弹性体,在接触面设置方面,由于荷载作用下桩土之间通常会产生明显的相对位移,故桩-土接触面切向性质采用“罚”接触,法向为“硬”接触,摩擦系数根据当地经验取 0.45,其余材料参数及土层划分如表 1、表 2,由于施工过程揭示溶洞中并无填充物及地下水,故本文仅对溶洞结构的空位置对桥桩基础的承载特性变化规律进行探讨,影响溶洞变形及稳定的因素只有重力场及外加荷载,其中重力场通过地应力平衡分析步施加于整个模型内,而桩体沉降实现过程中由于部分工况产生差异变形故采用荷载控制法相比位移法更符合实际情况。

表 1 桥桩材料参数

Table 1 Material parameters of bridge piles

名称	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	弹性模量 $E(\text{GPa})$	泊松比 μ
桥桩	2.5	20	0.15

表 2 岩土体材料参数

Table 2 Material parameters of rock and soil

名称	深度 H/m	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	压缩模量 E_s/MPa	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	摩擦角 φ°
黏土	3	1.8	6.6	0.3	25	8
灰岩	77	2.6	2 000	0.25	110	32

由于桥桩基础通常承载能力较高,按照设计荷载进行计算无法完全反应基础的变形特性及荷载传递规律,因此对于此类桩基承载特性的探究^[14-15]多数按照桩基检测标准相关规定^[16]或相关行业规范进行^[17],即采用逐级等量加载直至预估极限承载力,或达到行业规定最大位移作为极限承载力的判别标准,其中极限承载力可按下式计算:

$$R_a = u_p \sum_{i=1}^n l_i q_{sia} + A_p q_{pa} \quad (1)$$

式中: R_a 为预估极限承载力; l_i 为第 i 段桩长; q_{sia} 为桩侧摩阻力标准值,对于黏土层可取 $q_{sia}=40 \text{ kPa}$,灰岩(强~中风化) $q_{sia}=100 \text{ kPa}$; q_{pa} 为桩端岩石饱和抗压强度标准值,可取为 50 Mpa ^[18-19]。

经计算预估单桩极限承载力 $R_a=172.2 \times 10^3 \text{ kN}$,由于一组桥桩基础由两根桩基组成,故其总承载力为 $344.4 \times 10^3 \text{ kN}$;同时,对于桥梁工程而言,通常将墩台沉降量 40 mm 或差异沉降 20 mm 作为基础极限

荷载的控制标准。故桥桩极限承载力应按照两标准较小值进行选取。

2.3 计算工况

为充分探究溶洞位置对桥桩承载能力及荷载传递规律的影响,试验共设计3类9组不同空间位置溶洞以及1组无溶洞的原始工况:第1类工况为桥桩整体穿越溶洞,溶洞形心位于桥桩中心之下;第2类工况为桥桩侧穿溶洞,溶洞的边缘位于桥桩中心之下;第3类工况为桥桩临近溶洞,模拟信息如表3,表中 H_2 为桩身嵌岩段深度,D为桩径,竖向深度为溶洞中心的埋置深度,水平距离为溶洞边缘至桩基距离,位置信息如图4。此外,为真实反映桥桩基础

的力学行为,本文将荷载施加于承台中间以模拟桥墩荷载传递,并非直接施加于桩基之上。

3 桥桩沉降变形分析

3.1 桥桩基础荷载—位移曲线

图5为各桩荷载—位移曲线,其中桩顶位移取桥桩承台上部中点为参考点,桩底位移为两桩底平均位移。由图可知,无论溶洞在桥桩何位置,其桩顶

表3 模拟工况信息

Table 3 Information of simulated information

工况	类型	溶洞位置	
		竖向	水平
1	无溶洞	/	/
2	整体穿越溶洞	$H_2/6$	/
3	整体穿越溶洞	$H_2/2$	/
4	整体穿越溶洞	$5H_2/6$	/
5	侧穿溶洞	$H_2/6$	/
6	侧穿溶洞	$H_2/2$	/
7	侧穿溶洞	$5H_2/6$	/
8	临近溶洞	$H_2/6$	$0.5D$
9	临近溶洞	$H_2/6$	$1D$
10	临近溶洞	$H_2/6$	$2D$

(其中 $H_2/6, H_2/2, 5H_2/6$ 对应实际距离分别为3.8 m, 12.5 m, 19.2 m)
($H_2/6, H_2/2,$ and $5H_2/6$ correspond to the actual distance of 3.8 m, 12.5m, 19.2 m, respectively)

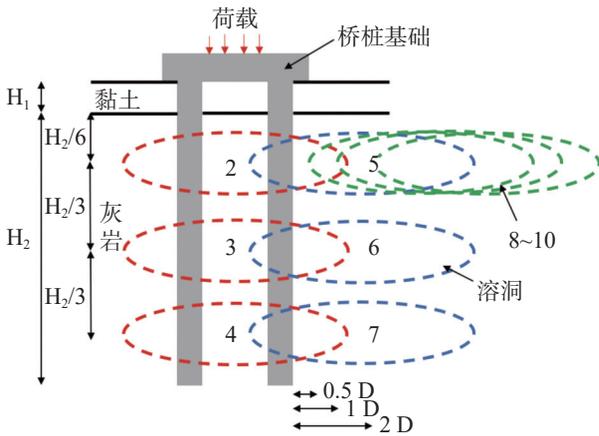
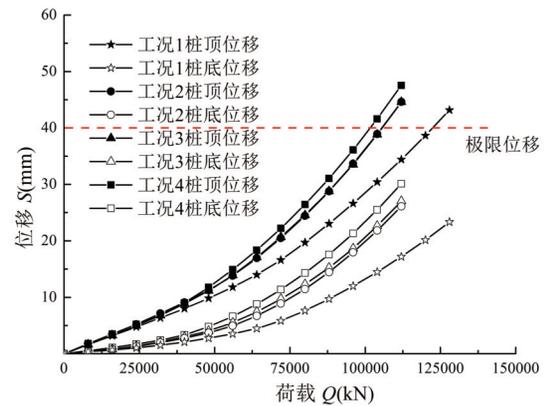
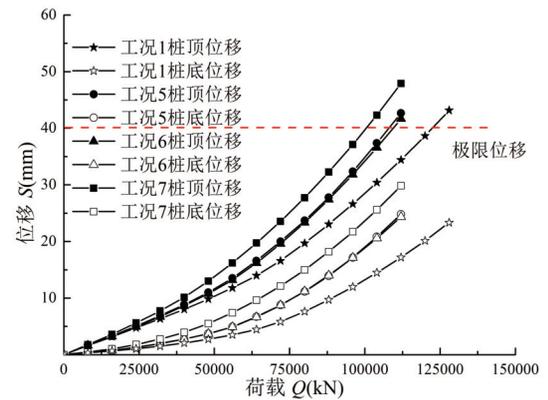


图4 不同计算工况溶洞位置

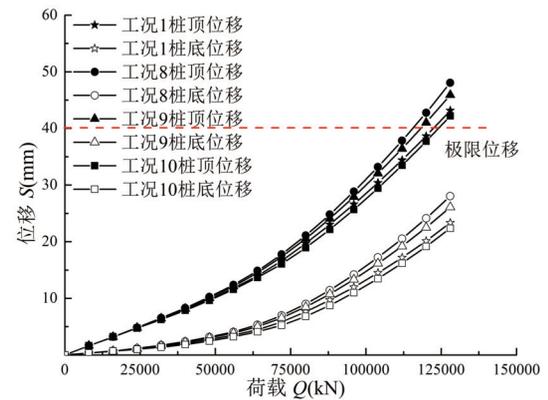
Fig. 4 Positions of karst caves under different working conditions of calculation



(a) 桥桩整体穿越溶洞



(b) 桥桩侧穿溶洞



(c) 桥桩临近溶洞

图5 荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-deformation curves

及桩底荷载—位移曲线均符合“缓变型”曲线发展规律,然而不同溶洞位置影响下,基础位移发展规律仍存在明显差异,当桥桩整体穿越溶洞时,无论溶洞位于桩身嵌岩段何位置,桥桩荷载—位移曲线均明显高于无溶洞存在情况,且不同溶洞深度下各曲线差异较小;当桥桩侧穿溶洞时,溶洞的存在对桥桩承载能力也产生了明显影响,3种工况下曲线非线性趋势增长明显,同荷载下位移值显著大于无溶洞存在情况,且这一趋势随荷载的增加而增加,尤其当溶洞位于桩身嵌岩段下部时,这种趋势更为明显;当桥桩临近溶洞时,桥桩与溶洞间不同水平距离对曲线发展的影响存在明显差异,当水平距离为0.5D时,溶洞的存在对桥桩承载能力影响明显,曲线整体高于无溶洞存在情况,随着水平距离的增加,当距离为1D及2D时,溶洞对桥桩的影响效果显著下降,尤其是当荷载较小时,其位移曲线与无溶洞情况近乎重合。

为进一步对比不同溶洞位置对桥桩承载能力的影响效果,将各桩极限荷载与位移统计于表4(以墩台沉降40mm或差异沉降20mm作为控制标准)。由表可知,在竖直方向上,当溶洞位于桩身嵌岩段下部时,溶洞的存在对桥桩承载能力影响最为显著,当桥桩完全穿过溶洞时,承载力相比无溶洞情况最大可衰减16.5%,而当桥桩侧穿溶洞情况下,最大衰减量可达17.58%;在水平方向上,溶洞离桩越近对桥桩承载能力影响也就越大,但是总体而言影响程度有限,承载力衰减最大值发生在0.5D位置处,承载力衰减量达5.57%,而当溶洞与桥桩距离达到2D后,溶洞的存在几乎对桥桩不再产生影响。说明当溶洞与桥桩不相交时,溶洞的存在对基础承载能力影响

表 4 桥桩极限荷载与位移

Table 4 Ultimate load and displacement of bridge piles

工况	极限荷载/kN	承载力衰减系数/%	桩顶位移/mm	桩底位移/mm	桩身压缩量/mm
1	121 941.8	/	40	20.09	19.91
2	105 271.0	13.67	40	22.46	17.54
3	105 760.1	13.27	40	23.56	16.44
4	101 825.6	16.50	40	24.40	15.60
5	107 852.9	11.55	40	22.67	17.33
6	109 358.8	10.32	40	23.06	16.94
7	100 505.5	17.58	40	23.89	16.11
8	115 146.8	5.57	40	21.88	18.12
9	117 801.9	3.39	40	21.57	18.43
10	123 774.4	-1.50	40	20.63	19.37

有限,尤其当水平距离大于2D后,其影响可忽略不计;而当溶洞与桥桩相交后,无论桥桩完全穿越溶洞还是侧穿溶洞,其最大影响位置均存在于桩身嵌固段下部,因此,工程实践中应对存在于桩端附近溶洞给予足够重视,防止承载力不足而发生破坏。

3.2 桥桩承台差异沉降

图6为桥桩承台沉降曲线,为方便比较,仅选取24000kN、72000kN以及各桩极限荷载为代表进行分析(下同)。由图可知,承台变形均服从两头小中间大的趋势,当荷载较小时,各桩承台变形差异较小,曲线基本重合;随着荷载的增加,承台差异变形逐渐明显,当桥桩整体穿越溶洞时,承台两侧变形基本相

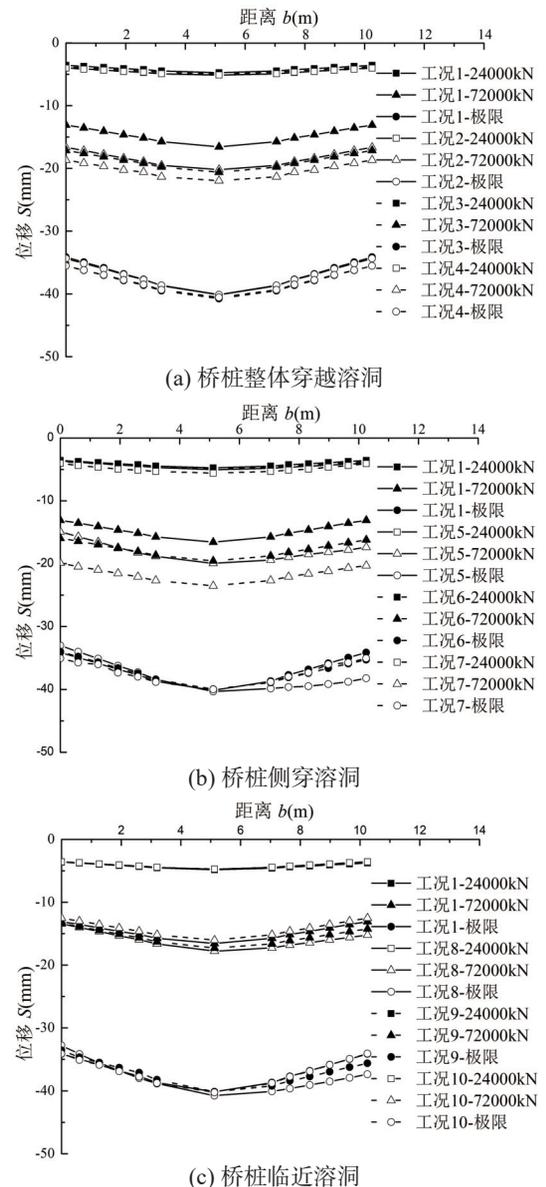


图 6 承台沉降曲线

Fig. 6 Settlement curve of pile cap

同, 差异沉降主要来源于上部荷载所造成的承台弯曲, 且在相同荷载下溶洞的存在并未对承台两侧与中心的差异沉降产生显著影响, 即使在极限荷载下, 承台最小差异沉降(工况 4)与最大沉降(工况 1)之间也仅减小约 1 mm; 当桥桩侧穿溶洞时, 承台两侧沉降不再对称而是随着荷载的增加穿越溶洞一侧沉降逐渐高于背离溶洞侧, 其中极限荷载下工况 5~7 承台两侧至中心最大差异沉降分别为 7.28 mm, 5.97 以及 4.94 mm, 而承台两端差异沉降分别为 5.17 mm, 1.28 mm 以及 0.2 mm, 当溶洞位于桩身嵌岩段上部时承台两侧差异沉降达到最大值, 可达最大差异沉降量的 70% 以上; 当桥桩临近溶洞时, 溶洞存在对桥桩承台整体沉降影响有限, 在相同荷载下承台位移基本处于同一水平, 仅在靠近溶洞侧沉降有所差异, 当达到极限状态时这种差异最为明显, 工况 8~10 承台两侧差异沉降分别为 4.58 mm, 2.09 mm 以及 0.01 mm。说明当溶洞非对称分布于桥桩之下时, 承台差异沉降不再仅来源于上部荷载的作用, 溶洞也是影响承台产生差异主要因素之一, 溶洞距离地表或桥桩越近则影响越大。

进一步分析桥桩倾斜对上部结构影响可知, 根据规范^[14]规定, 当高度大于 30 m 时桥梁墩台垂直度不可大于 $H/3000$, 本文依据现场设计情况取高度 $H=50$ m, 则桥墩允许倾斜量约为 16.7 mm, 而根据式(2)所得工况 5~10 承台差异沉降所造成的上部结构倾斜量分别为: 24.74 mm, 6.12 mm, 0 mm, 21.9 mm, 10 mm, 0 mm。可见当溶洞位于桥桩嵌岩段上部或溶洞距离桥桩过近时桥桩的倾斜将会使桥墩垂直度远超规范建议值, 而当溶洞位于嵌岩段中部或距离桥桩水平距离大于 1D 之后因溶洞存在而对上部结构稳定性的影响将大幅衰减, 因此当溶洞位于桩身嵌岩段上部或当溶洞距桥桩距溶洞不足 1D 时, 应对溶洞采取回填或注浆等加固措施以防止基础差生过大差异沉降而影响上部结构安全。

$$b' = \frac{s'}{b}H \quad (2)$$

式中: b 为承台宽度, 取 10.45 m, s' 为差异沉降, H 为桥墩高度, 取 50 m。

4 桩身荷载传递规律分析

图 7—图 9 为各桩不同荷载下桩身轴力分布曲线, 其中图 7 轴力为桥桩两桩平均值。由图可知, 各

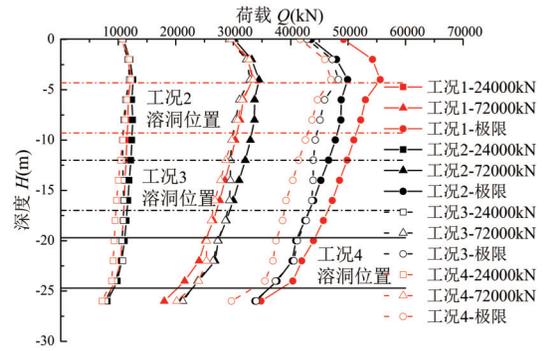
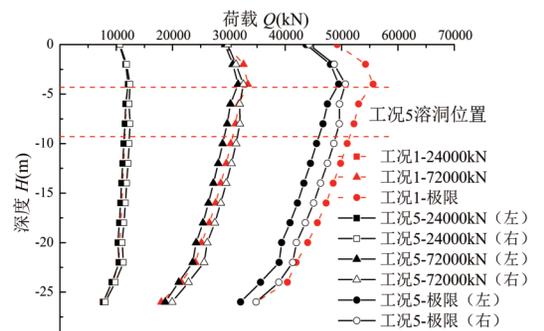
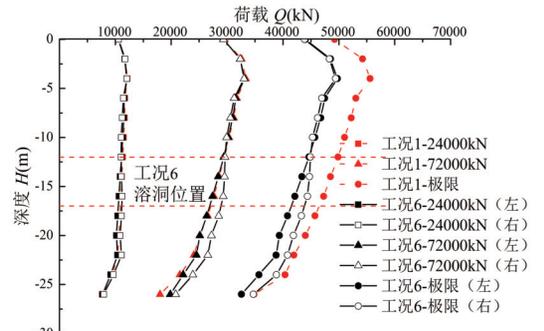


图 7 桥桩整体穿越溶洞轴力分布曲线

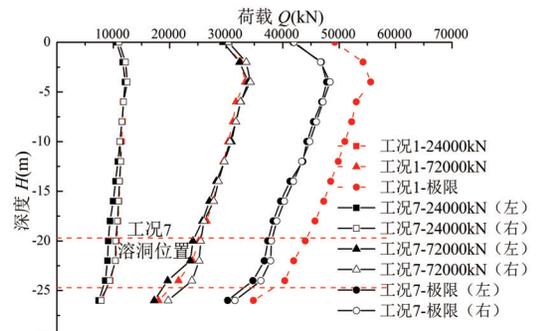
Fig. 7 Distribution curve of axial force of bridge piles crossing the karst cave



(a) 工况 5 轴力布曲线



(b) 工况 6 轴力布曲线



(c) 工况 7 轴力布曲线

图 8 桥桩侧穿溶洞轴力分布曲线

Fig. 8 Distribution curve of axial force of bridge piles passing through the karst cave from one side

桩轴力随深度增加整体呈下降趋势, 随荷载增加曲线斜率逐渐最大, 但在工况 2~7 溶洞位置处轴力衰

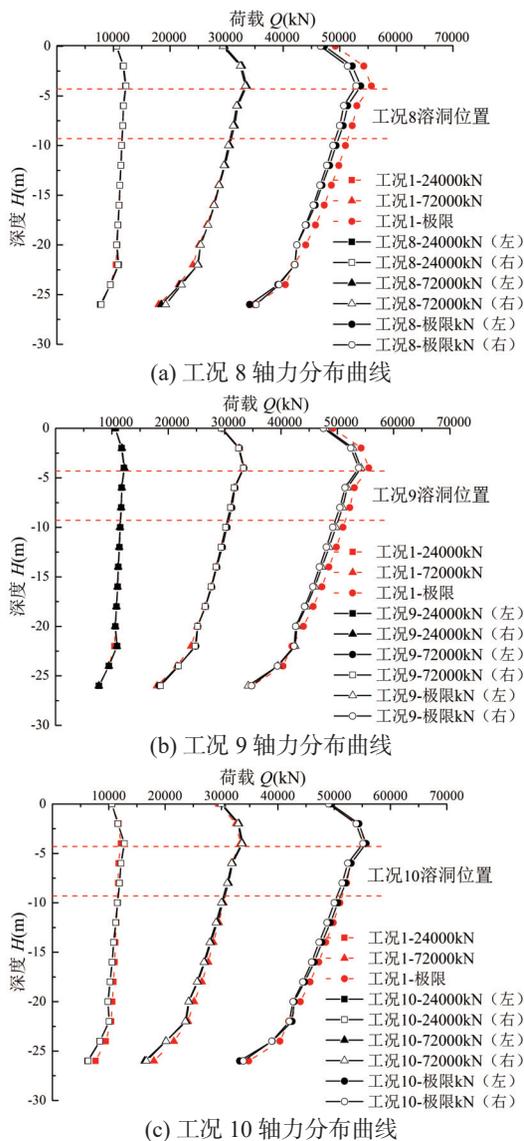


图 9 桥桩临近溶洞轴力分布曲线

Fig. 9 Distribution curve of axial force of bridge piles located near the karst cave

减缓慢,并未随荷载增加而出现明显改变,且曲线在桩顶位置一定范围内却出现轴力随深度小幅增加现象,产生上述现象的主要原因是:承台在上部荷载作用下发生弯曲进而使桩基在上部一定范围内受弯,轴力未沿竖直方向传递而造成的误差。

进一步对各桩承载能力变化规律分析可知,对于侧阻力,当桩基整体穿越溶洞时,位于溶洞上部桩身轴力变化曲线与同荷载与无溶洞情况基本相同,当基础穿越溶洞后轴力曲线整体略高于无溶洞时轴力曲线;而对于桥桩侧穿溶洞情况,桥桩两侧桩基轴力分别位于无溶洞时基础轴力曲线左右两侧,原因是背离溶洞侧(左侧)由于桥桩基础受荷偏转过程中受到一定拉伸作用而使轴力略有减小,而穿越溶洞

侧(右侧)轴力则在穿越溶洞后明显大于无溶洞情况;而对于桥桩临近溶洞情况,在同荷载下左右两侧桩基与无溶洞情况轴力曲线基本重合,侧阻力未因桩周溶洞的存在发生显著变化。说明溶洞对桩身侧阻力的影响主要体现在当桩基穿越溶洞时桩基临空段侧阻力的损失,而对其他位置侧阻力的发挥影响不大。

对于端阻力,各桩极限状态下端阻力发挥在 54%~64% 之间,属于典型端承桩。以 72 000 kN 为例,对比各桩同荷载下端阻力变化情况可知,当桥桩整体穿越溶洞时,溶洞的存在使桥桩端阻力提高约 12%~18%,当桥桩侧穿溶洞时,桥桩端阻力相比无溶洞时变化范围约为-4%~10.5%,当桥桩临近溶洞时端阻力变化很小,基本不产生影响。因此溶洞对嵌岩桩端阻力影响程度大小关系可大致划分为:桥桩整体穿越溶洞>桥桩侧穿溶洞>桥桩临近溶洞。

5 溶洞变形规律及稳定性分析

5.1 溶洞顶板位移分析

图 10 为各工况下溶洞顶板随荷载变形情况,由图可知,不同工况下溶洞顶板位移均随荷载增加而增加,溶洞埋深越浅则相同荷载下顶板位移越大,溶洞与桥桩水平距离越近则在同荷载下顶板位移亦越大。其中当桥桩整体穿越溶洞时,溶洞顶板位移呈两头小中间大的发展趋势,其最大位移发生在两桩之间,且桩基位置处位移发展与其他位置相比无明显突变,进一步结合工况 2 极限状态下位移云图分析,发现溶洞顶板位移等值线呈圆形由桥桩中心均扩散,说明对于桥桩整体穿越溶洞情况,溶洞的破坏形式主要是顶板受压而造成的拉伸破坏;当桥桩侧穿溶洞时,溶洞位移曲线也是呈中间大两头小的分布形式,但是溶洞顶板最大位移均发生在桩侧附近,且桩基位置处溶洞位移曲线发生明显突变,其中工况 5 突变最为明显,桩基位置沉降量达 25.5 mm,超过总位移量 70% 以上,进一步结合相应位移云图分析可知,位移场在桩基附近有明显集中现象,且随水平距离的增加,位移场的集中现象衰减明显,说明对于桥桩侧穿溶洞情况而言,溶洞受力处于偏压状态,桩身附近的剪切破坏是溶洞的主要破坏形式;当桥桩临近溶洞时,溶洞位移曲线整体表现为近桩端大,远桩端小的发展趋势,但是溶洞与桥桩距离过近时,其曲线发展形式会产生一定变化,当水平距离为

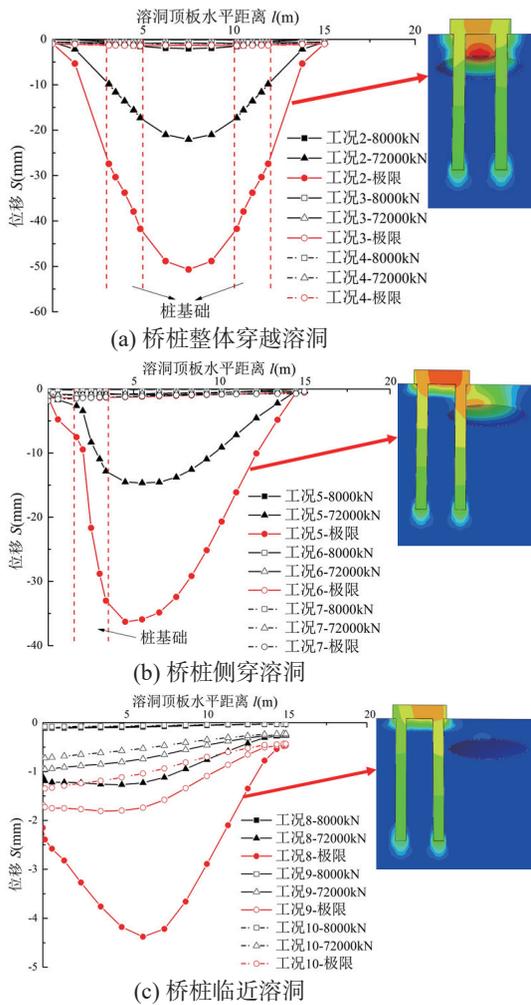


图 10 溶洞顶板位移

Fig. 10 Roof displacement of the karst cave

0.5D 时, 虽然近桩端位移仍大于远桩端, 但是最大位移发生位置变为距离桩基 6.2 m 位置处, 而最大位移发生点的纵向深度约为 4.5 m, 而根据摩尔—库理论, 基础剪切破裂面与水平面夹角应为 $(45^\circ - \varphi)$, 通过式 (3) 对上述位置关系进行验证发现承台剪切破裂面位置为 6.16 m 与最大位移发生位置基本重合, 因此, 对于桥桩临近溶洞情况, 溶洞潜在破坏形式主要是由上部承台的冲切破坏所造成。

$$l' = \sum_{i=1}^n h_i \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi_i}{2}\right) \quad (3)$$

式中: l' 为计算深度处承台边缘与破裂面水平距离; h_i 为计算土层厚度, 其中黏土层为 3 m, 灰岩 1.5 m; φ 为岩土体内摩擦角, 黏土取 8° , 灰岩取 32° 。

5.2 桥桩作用下溶洞稳定性分析

图 11 为极限状态时不同溶洞位置下溶洞顶板最大位移分布曲线, 由图可知, 当桥桩整体穿越溶洞

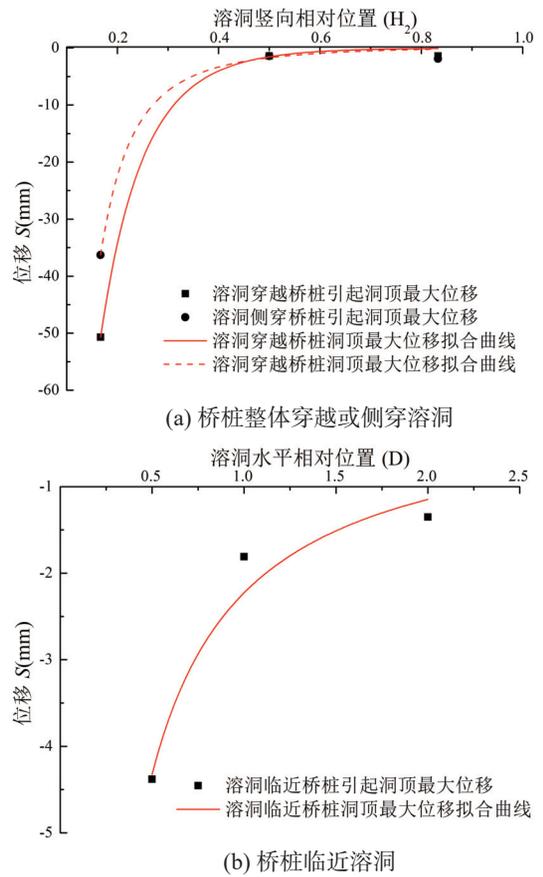


图 11 溶洞顶板最大位移分布曲线

Fig. 11 Distribution curve of maximum displacement of the karst cave roof

或侧穿溶洞时, 溶洞顶板最大位移随溶洞埋深的减小变化很小, 基本为一条与水平方向平行的直线, 此时埋深对溶洞变形的影响很小, 溶洞基本处于稳定状态, 而当溶洞埋深进一步减小至桩身嵌岩段上部时, 溶洞顶板最大位移随埋置深度的减小大幅上升, 呈明显的非线性发展规律。当溶洞位于 $H_2/6$ 时, 经桥桩侧穿的溶洞在 107852.9 kN 极限荷载作用下最大位移可达 36.3 mm, 与桥桩位移非常接近; 而当桥桩整体穿越溶洞时, 在 105271 kN 极限荷载作用下最大位移可达 50.68 mm, 溶洞顶板位移明显大于桩基位移, 说明此时溶洞已进入破坏状态, 且破坏时荷载尚小于桥桩侧穿溶洞情况。因此, 对于桥桩穿越溶洞的情况, 尤其是桥桩整体穿越溶洞, 当溶洞位于嵌岩段上部时应当充分重视桥桩在工作状态下对溶洞稳定性的影响, 并采取注浆、回填片石或其他措施对其进行加固。

当桥桩临近溶洞时, 溶洞顶板位移在 1D~2D 之间为一条倾斜直线, 在 0.5D~1D 之间位移非线性发展明显, 但是相比桥桩穿越溶洞情况, 当桥桩临近溶

洞时所引起的位移整体较小,溶洞均基本处于稳定状态,因此,对于桥桩临近溶洞的情况,仅需注意当距离过小时($<0.5D$)可能引起的溶洞局部稳定性问题。

6 结论及建议

(1)溶洞对桥桩承载能力具有削弱作用,影响程度随位置不同而有所差异:当桥桩临近溶洞时,溶洞对桥桩的影响随距离的增加而减小,且水平距离大于 $2D$ 后(D 为桩径),影响可忽略不计;当桥桩穿越溶洞时,桥桩承载能力随溶洞埋深增加而降低,溶洞位于桩身嵌岩段下部时影响达到最大,承载力减小 $16.5\% \sim 17.5\%$ 。工程中对存在于桩端附近溶洞需给予足够重视。

(2)溶洞的非对称分布使承台产生差异沉降,溶洞埋深越浅或距离桥桩越近则对工程影响越大,尤其当溶洞位于桩身嵌岩段上部或当溶洞距桥桩距离不足 $1D$ 时,应对溶洞采取回填或注浆等加固措施,防止基础发生过大大差异沉降。

(3)对于端承桩而言,溶洞对桩身侧阻力的影响主要体现为桩基临空段侧阻力的损失,而溶洞对端阻力影响程度排序为:桥桩整体穿越溶洞 $>$ 桥桩侧穿溶洞 $>$ 桥桩临近溶洞。

(4)当桥桩整体穿越溶洞时,溶洞破坏形式主要为顶板拉伸破坏;当桥桩侧穿溶洞时,溶洞主要在桩基位置附近产生剪切破坏;当桥桩临近溶洞时,溶洞的潜在破坏模式为来自承台的冲切破坏。

(5)当桥桩穿越溶洞时,应当充分重视桥桩上部荷载对溶洞稳定性的影响,并采取相应加固措施;当桥桩临近溶洞时,需注意距离过小时($<0.5D$)可能引发的溶洞局部失稳。

参考文献

- [1] 郭静芸,李守定,李滨,李晓,毕鑫涛,方然可.岩溶山区崩滑灾害变形破坏地质模式分类[J].中国岩溶,2020,39(4):478-491.
GUO Jingyun, LI Shouding, LI Bin, LI Xiao, BI Xintao, FANG Ranke. Geological models classification of deformation and failures for collapses and landslides in karst mountainous areas[J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(4): 478-491.
- [2] 李强,秦余顺.中老铁路桥梁桩基岩溶处理施工技术研究[J].中国岩溶,2019,38(4):607-611.
LI Qiang, QIN Yushun. Technologies to deal with karst caves beneath pile foundation of the big bridge on the Laos-China railway[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(4): 607-611.
- [3] 王伟.岩溶区溶洞型桩基承载机理及溶腔整治技术研究[D].北京:北京交通大学,2019.
WANG Wei. Study on bearing mechanism of pile penetrating karst caves and cavern treatment technology in karst Area[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [4] 石振明,刘臻,彭铭,陶凤娟,刘春生.钻孔灌注桩桩底溶洞声呐探测方法及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(1):177-186.
SHI Zhenming, LIU Liu, PENG Ming, TAO Fengjuan, LIU Chunsheng. A sonar detection technology for karst cavities under bored piles and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(1): 177-186.
- [5] 赵杰.大直径桩桩位岩溶管波探测技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.
ZHAO Jie. Research of tube wave prospecting karst development under large diameter pile[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.
- [6] 张健.顶板倾斜隐伏溶洞区桩基承载机理与稳定性评价研究[D].济南:山东大学,2019.
ZHANG Jian. Study on bearing mechanism and stability evaluation of pile foundation in karst cave areas with inclined roof[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [7] 冯明伟.岩溶区桥梁桩基承载机理及试验研究[D].长沙:湖南大学,2014.
FENG Mingwei. The bearing mechanism and experimental research of bridge pile foundation in karst area[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [8] 袁维,刘尚各,聂庆科,王伟.基于冲切破坏模式的嵌岩桩桩端溶洞顶板临界厚度确定方法研究[J].岩土力学,2019,40(7):2789-2798.
YUAN Wei, LIU Shangge, NIE Qingke, WANG Wei. An approach for determining the critical thickness of the karst cave roof at the bottom of socketed pile based on punch failure mode[J]. *Rock and soil mechanics*, 2019, 40(7): 2789-2798.
- [9] 黄生根,梅世龙,龚维明.南盘江特大桥岩溶桩基承载特性的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5):809-813.
HUANG Shenggen, MEI Shilong, GONG Weiming. Testing study on bearing behavior of piles for Nanpan river great bridge in karst area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 809-813.
- [10] Wang P, Ding H, Zhang P. Influence of karst caves at pile side on the bearing capacity of super-long pile foundation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020(2): 1-13.
- [11] Zheng C B, Xu J. Discussion on treatment technology of reinforcement pile in karst area[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 580-583: 52-55.
- [12] Zhao M H, Zhu Z R, Huang M H, Yang C W, Xu Z J. Study on thickness of safety for cave roofs suffered bending failure in karst areas[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(11): 4201-4209.
- [13] 刘士锋.桩筏基础与地基土共同作用的三维数值模拟研究

- [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- LIU Shifeng. The study on the interaction of stake-raft foundation and soil[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2007.
- [14] 郑刚, 张立明, 王琦. 超长桩荷载传递机理有限元分析[J]. 天津大学学报, 2012, 45(11): 945-952.
- ZHENG Gang, ZHANG Liming, WANG Qi. Finite element analysis on load transfer mechanism of overlength piles[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(11): 945-952.
- [15] 郭中华, 原法芳, 王华, 梁斌. 海上淤泥区斜拉桥超长桩基自平衡法承载力试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(8): 181-190.
- GUO Zhonghua, YUAN Fafang, WANG Hua, LIANG Bin. Self-balancing method-based experimental study on bearing capacity of super-long pile foundation for cable-stayed bridge in marine silt area[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(8): 181-190.
- [16] 中华人民共和国建设部. JGJ106-2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ106-2014 Technical code for testing building foundation piles[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. JTGTF50-2011-1 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTGTF50-2011-1 Technical specification for construction of highway bridges and culvert[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [18] 宋战平, 肖珂辉, 杨腾添. 渗透压力作用下灰岩单轴压缩变形特性研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(5): 649-653, 703.
- SONG Zhanping, XIAO Kehui, YANG Tengtian. Study on deformation characteristics of limestone under uniaxial compression considering seepage pressure[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2019, 51(5): 649-653, 703.
- [19] 杨冲, 左双英, 张元帅, 蒲泉, 王露, 何兴. 水平层理棱柱形灰岩抗压强度尺寸效应[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 325-331.
- YANG Chong, ZUO Shuangying, ZHANG Yuanshuai, PU Quan, WANG Lu, HE Xing. Compressive strength size effect of horizontal layered prismatic limestone[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(26): 325-331.

Study on bearing characteristics of bridge piles and deformation mechanisms of karst caves in karst area

ZHAO Guiqing¹, ZHANG Jilu^{2,3}, ZHOU Xiaohan^{2,3}, LIU Xinrong^{2,3}, LIU Xinlin^{2,3}, GUO Hongqing¹

(1. SINOHYDRO Bureau 14 Co., LTD., Kunming, Yunnan 650041, China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 3. National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas (Chongqing), Chongqing 400045, China)

Abstract Due to the highly undulating terrain, complex geological conditions, and the widespread distribution of karst topography developed with underground karst caves in Southwest China, the construction of bridges and tunnels will inevitably traverse areas that contain these karst caves. The karst effect changes the structure of rock masses, weakening the strength and increasing the permeability of the surrounding soil. In regions where caves are developed, the construction of pile foundations will not only encounter challenges in pile formation but also will experience impacts on the load-bearing capacity of foundations due to the presence of these caves. Prolonged loads can easily result in severe deformations, tilting, or even collapses of the superstructure. To elucidate the impact mechanisms of caves on the bearing characteristics of bridge piles during construction in karst regions, this study focused on viaduct piles from a highway project in Guizhou. Numerical simulations were employed to examine the settlement patterns of piles that completely traversed the cave, those that laterally intersected with the cave, and those that were adjacent to caves. Furthermore, the axial force distribution in the piles and the deformation characteristics of the caves were analyzed, along with the stability of the caves under various working conditions.

The research findings indicate as follows, (1) Caves reduce the bearing capacity of bridge piles, although the degree of this effect varies by location. When bridge piles are situated near caves, the influence diminishes with increasing distance, becoming negligible when the horizontal distance exceeds 2D (where D represents the pile diameter). Conversely, when bridge piles pass through caves, their bearing capacity decreases as the burial depth of the caves increases. The maximum impact occurs when the cave is located directly beneath the rock-embedded section of the pile, resulting in a reduction of bearing capacity by approximately 16.5% to 17.5%. Engineering practices should give due consideration to caves near the pile tips. (2) The asymmetric distribution of caves contributes to differential

settlement of the foundation. The shallower the cave or the closer it is to the bridge pile, the more significant the impact. Specifically, when the cave is located above the rock-embedded section of the pile or is less than 1D away from the bridge pile, it is necessary to implement reinforcement measures such as backfilling or grouting to prevent excessive differential settlement of the foundation. (3) For end-bearing piles, the influence of the cave on the side resistance of the pile mainly manifests as a loss of side resistance in the exposed section of the pile foundation. The impact of caves on end resistance is ranked as follows: piles fully traversing the cave>piles laterally crossing the cave>piles near the cave. (4) When bridge piles fully traverse the cave, the predominant failure mode of the cave is tensile failure of the roof. When bridge piles laterally cross the cave, shear failure primarily occurs near the pile foundation. When bridge piles are in close proximity to the cave, the potential failure mode is punching shear failure from the foundation. (5) When bridge piles cross the cave, it is crucial to consider the impact of the loads on the stability of the cave and to implement appropriate reinforcement measures. Additionally, when bridge piles are near the cave, caution must be exercised regarding the potential for localized instability of the cave if the distance is too short (<0.5D).

Key words bridge pile, karst cave, bearing characteristics, stability, karst area

(编辑 张玲)

警惕! 极端干热气候正在增加岩溶石漠化区生态风险

据自然资源报 11 月 21 日消息随着全球气候变化和极端天气事件的频发,我国南方岩溶区正面临着两大困境:一是暖干气候特征愈发明显,2022 年气候公报显示本年度南方大部分地区降水量偏少 1~3 成,其中西南地区降水量减少 15%,全国极端高温事件站次比为 1.51;二是降雨时空分布极度不均,2022 年南方大部分地区降水日数偏少 10~20 天,雨季多集中于 5 月至 8 月,9 月至次年 3 月持续干旱无降雨,南方春秋旱灾影响范围广、持续时间长。

最新调查成果显示,中国陆域生态分区中的衡桂岩溶丘陵农田生态区(主要涉及广西和湖南两省区),受 2022 年持续干热事件的影响,已造成 210 多 km² 植被枯死,包括乔木、灌木和竹林。植被枯死区域的表层岩溶发育程度相对一般,且多为封山育林的石漠化生态修复与保护区。2023 年,受全球气候变化持续作用,多项气候指标均创新高,对于生态环

境脆弱、承载能力较低的岩溶生态系统,长期间接性干热天气极易导致岩溶生态水文“双向调节”功能失调,出现植被枯死、森林退化、石漠化恶化的生态风险。极端干热气候事件已成为导致岩溶石漠化区生态风险增加的另一重要因素。

为科学有效地推进岩溶石漠化治理,提高极端气候下的生态风险应对能力,持续提升岩溶生态系统质量和稳定性,建议在后续开展岩溶石漠化生态保护与修复过程中做好以下几点:一是持续开展南方岩溶脆弱区石漠化、森林退化等重大生态问题的监测预警;二是加强极端气候下岩溶生态系统的响应机制研究,积极探索退化岩溶生态系统的恢复途径;三是提高大众生态安全意识,降低对受损生态环境的人为干扰力度。

(供稿:牛勇 刘绍华)