基于隐伏岩溶洞穴特征的风机基础变形分析

王修儒[1]，潘威杰[1]，陈 胜[1]，申云山[1]，黄兴艺[1]，李冬冬[2]

（1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，杭州 311122；2. 华北水利水电大学地球科学与工程学院，郑州 450045）

摘要：碳酸盐分布区域发育的隐伏岩溶洞穴是制约该区域风力发电设施建设和安全运营的重要因素之一。因此，亟须厘清隐伏岩溶洞穴特征对风机基础变形与稳定的影响，为岩溶区风电清洁能源生产选址提供科学技术支撑。为此，以云南省文山州丘北县锦屏西风电场为背景，首先通过现场调研、地质勘探查明该区域岩溶发育特征；然后基于典型岩溶洞穴特征概化地质模型，建立数值分析模型，探讨上部结构荷载作用下隐伏洞穴埋深、隐伏洞穴与风机基础空间位置关系、隐伏洞穴形状等参数对风机基础和上覆岩体变形分布特征的影响。结果表明，岩溶洞穴隐伏深度、空间位置、形状等对基础在受力条件下的变形破坏特征影响显著。风机基础选址时应确保基底与隐伏洞穴顶板距离大于1倍基础埋深，且尽可能增加基础中心与隐伏洞穴中心的间距。当溶洞不可避开时，优选裂隙型溶洞，避免将风机基础坐落在扁平型溶洞之上。

关键词：隐伏岩溶洞穴；风机基础；变形特征；优化选址

中图分类号：TU471.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)03－0055－12

在“双碳”目标下，风能资源丰富的云贵地区成为重要的清洁能源生产基地。在岩溶发育区，溶洞、导水裂隙及破碎带的存在导致岩溶塌陷灾害的产生具有随机性、突发性和隐蔽性，对风力发电设施建设与安全运营构成严重威胁，其中隐伏岩溶洞穴的危害更为突出[1]。因此，在风力发电工程建设前，基于对场地岩溶发育程度的勘探调查，分析隐伏岩溶洞穴特征对上覆结构稳定的影响，可为工程建设和安全运营提供科学依据。

准确查明隐伏岩溶洞穴空间展布、围岩特性是开展稳定评价的基础。常见的隐伏岩溶洞穴探测方法有地质钻探、地球物理勘探以及二者相结合的方法[2-4]。钻探揭露的岩芯可直观地反映出场地地层岩性、破碎带、溶洞充填物性质、岩溶管道和断层的分布情况。但可溶岩的高度各向异性和溶蚀界面的随机性使得钻孔资料不能准确地反映区域岩溶发育的真实情况，且钻探的成本较高，故常结合物探方法完成隐伏岩溶的探测工作。其中，跨孔CT(计算机断层扫描)法通过在一个钻孔内等间距人工激发电磁波、地震波、电场等物理场，在相邻钻孔内多点接收对应信号，可以对两个钻孔间洞穴发育情况进行精细探测，目前已成为一种广泛应用的勘探方法[5-8]。瑞利面波则因衰减慢、能量强等优点，在岩溶洞穴勘探方面的研究得到较多重视[9-11]。此外，具有探测效率高、空间分辨率高、异常图像直观明显等优点的新型探测方法——地质雷达，在隐伏岩溶洞穴探测方面得到了广泛应用[12-15]。

基于上述方法获取的隐伏洞穴基本形态，为洞穴稳定性评价奠定了基础。在岩溶洞穴稳定性评价方面，主要采用理论分析、模型试验、数值模拟等手段，对洞壁围岩稳定、相邻隧道(洞)安全状况进行评价[16-19]。杨秀竹等[20]采用物理模型试验方法探讨了溶洞位置、大小等对地铁隧道衬砌结构应变、稳定性、围岩压力等的影响。谢鹏[21]通过理论解析方法，得到了浅埋隐伏柱状和球状溶洞围岩应力分量，并探讨了半径和深度对应力分量的影响。随着数值仿真技术的快速发展，其在复杂形态溶洞模型构建、快速分析因素影响等方面得到广泛应用。陈禹成等[22]、曹林卫等[23]、刘磊等[24]、张京亮等[25]采用数值计算方法分析了岩溶区隐伏溶洞与

收稿日期：2025-06-05

基金项目：国家自然科学基金(U1704243)；河南省自然科学基金(232300420318)

作者简介：王修儒(1988—)，男，青海海东人，工程师，研究方向为工程管理、岩土体稳定；潘威杰(1996—)，男，河南尉氏人，工程师，研究方向为工程管理、岩土体稳定；陈胜(1994—)，男，云南腾冲人，工程师，研究方向为岩土体稳定；申云山(1993—)，男，云南昭通人，工程师，研究方向为岩土体稳定；黄兴艺(1997—)，男，云南昭通人，工程师，研究方向为岩土体稳定；通信作者李冬冬(1989—)，男，河南漯河人，博士，副教授，研究方向为岩土体稳定。

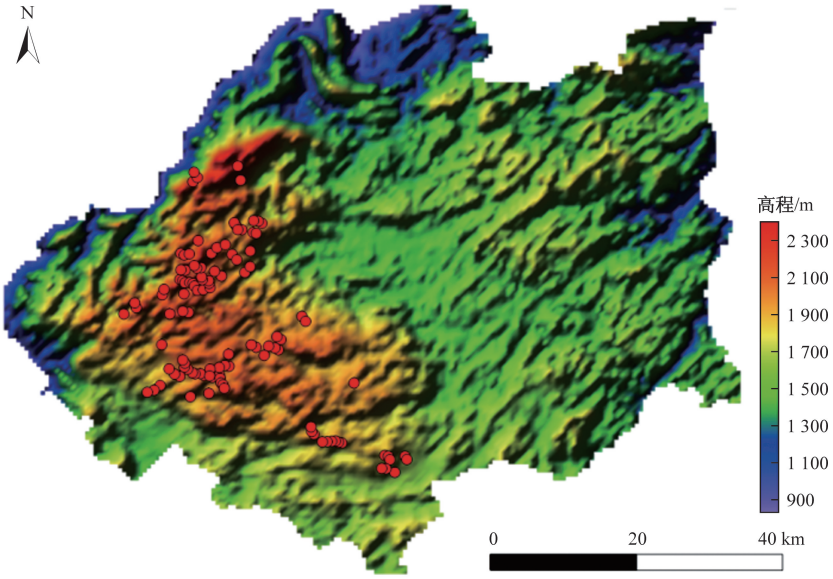
隧道相对位置关系对隧道围岩稳定性的影响。

已有研究多针对上覆岩体自重作用下溶洞或临近洞室稳定状态分析，较少考虑隐伏溶洞特征在附加荷载作用下对上覆结构物变形及稳定性的影响。为此，以云南文山州岩溶区锦屏西风电场为背景，在分析研究区岩溶发育特征的基础上，概化隐伏岩溶洞穴地质模型，构建数值计算模型，分析隐伏岩溶洞穴埋深、形状、位置等参量对风机基础及上覆岩土体稳定性的影响，进而为风机基础位置和处置方案选择提供依据。

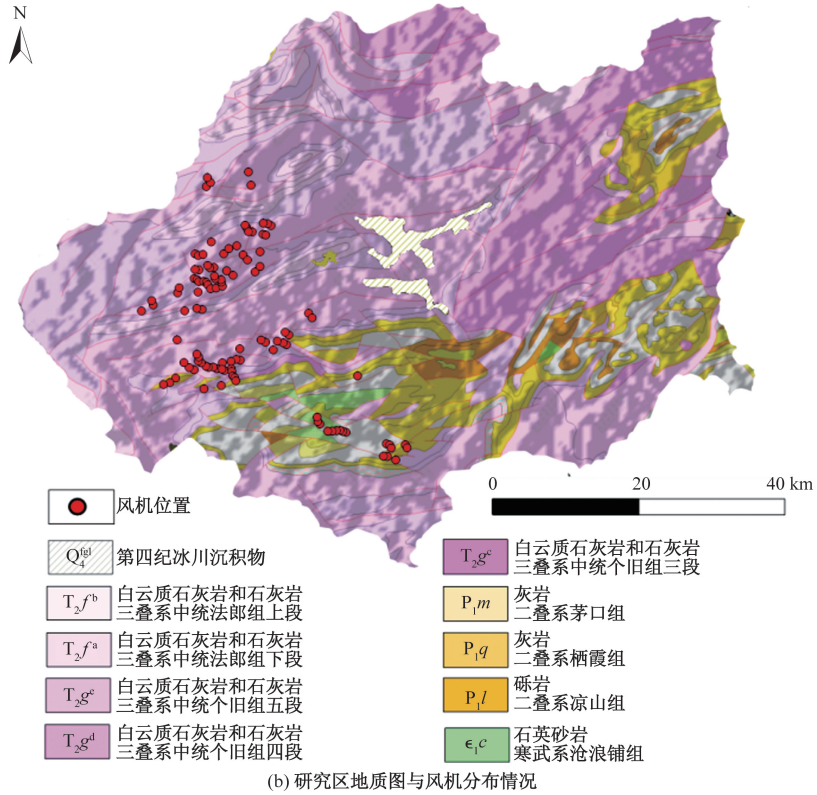
1　研究方案

1.1　研究区岩溶发育基本特征

云南文山州锦屏西风电场位于岩溶发育区域，设计总装机容量为 530 MW，共计 112 台风机。研究区地处滇东南岩溶山原丘陵地带，地势西南高、东北低，六诏山支系大总山纵横全境，境内最高海拔（羊雄山顶峰）2 501.8 m，最低海拔（弄位村）782 m。拟建风电场主要位于西部山区[图 1(a)]。



(a) 研究区地形图与风机分布情况

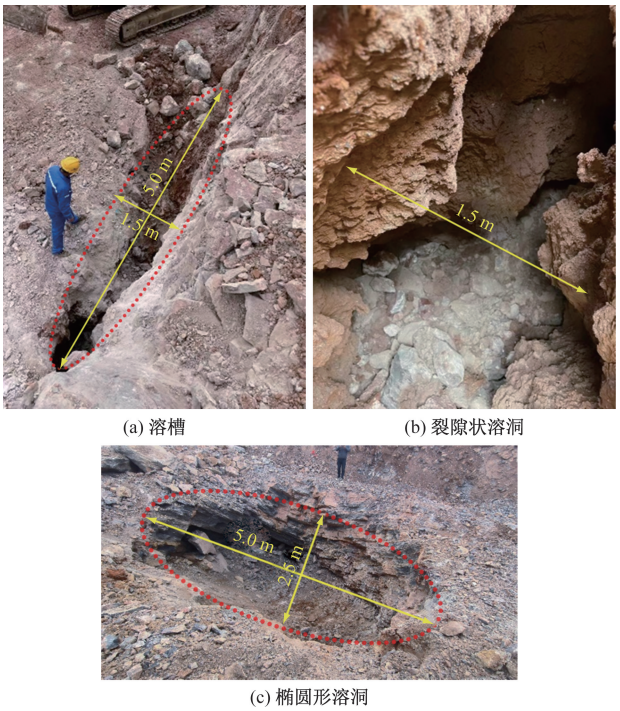


(b) 研究区地质图与风机分布情况

图 1　研究区地形与地层岩性

区内大地构造单元主要属于华南褶皱系之滇东南褶皱带的文山—富宁断褶束和丘北—广南断褶束的交界部位。近场区 25 km 范围内发育的区域断裂主要为江边街-陆良断裂、文麻断裂、倮可者断裂。各风机位勘探深度内出露的地层主要为第四系耕植土(Q_4^{pd})、残坡积层(Q_4^{el+dl})粉质黏土、红黏土,下伏基岩为三叠系上统鸟格组(T_3n)粉砂质泥岩、粉砂岩、三叠系中统法郎组上段(T_2f^b)泥岩及三叠系中统个旧组第四段(T_2g^d)灰质白云岩、第五段(T_2g^e)灰岩,其中白云岩和灰岩为场区主要地层,除极个别风机场地外,均为该层,地表多呈块石、石芽状分布[图 1(b)]。

综合来看,研究区内主要岩溶现象为白云岩、灰岩岩溶裂隙、溶沟、溶槽、溶洞。岩溶石芽间的溶沟深度一般在 1 m 左右,按《岩溶地区建筑地基基础技术标准》(GB/T 51238—2018)岩溶发育程度分类,工程区岩溶发育程度以弱发育为主。场区内多发育溶蚀沟槽,深度一般在 1 m,宽度 2～5 m,沟槽内多充填黏土,岩石地表呈石芽形式分布。此外,可见地表多处发育岩溶漏斗或落水洞,长、宽 10～15 m,深 8 m 左右,杂草、植被茂盛。部分风机场地钻探勘察时发现溶洞,如 9 号风机在挖至基础设计标高有一溶槽,长约 3 m,深约 1 m,宽约 0.4 m。15 号风机在离风机中心点约 4 m 处发现溶洞,深约 5 m,长、宽各 3～5 m(图 2)。



(a) 溶槽　(b) 裂隙状溶洞

(c) 椭圆形溶洞

图 2　研究区隐伏岩溶洞穴发育特征

1.2　数值分析计算方案

数值模型的构建以风电场典型风机基础及地层条件为背景,在概化对应地质模型的基础上,分别建立具有不同岩溶洞穴特征的数值计算模型。由于岩溶洞穴空间形态不规则性强,本研究仅进行规律性探讨。因此,根据现场实际揭露的岩溶洞穴几何展布,将洞穴形态简化为圆形或椭圆形。

基于风电场勘察和施工期间揭露的 15# 风机下伏溶洞几何信息,采用直径为 4 m 的圆形溶洞。针对岩溶洞穴隐伏深度问题,分别考虑岩溶洞穴顶板距风机基础底面为 1、3、5 m 的情况;针对岩溶洞穴与风机基础位置关系,分别考虑溶洞隐伏深度为 1 m 时,溶洞中心距风机基础竖向受荷中心距离分别为 0、1、7、16 m 的情况,分别对应基础正下方、基础一侧中部正下方、基础边缘正下方等位置;针对溶洞形态问题,分别考虑溶洞跨度与高度比值为 4∶1、4∶2、4∶3、1∶1、3∶4、2∶4、1∶4等椭圆形溶洞的情况,其中椭圆长轴长度固定为 4 m,具体方案见表 1。典型的数值计算模型如图 3 所示。各工况下数值计算模型主要包括风机基础、褥垫层、回填土体、灰岩(白云岩)地基、岩溶洞穴等部分。计算模型各部分岩土体参数依据材料特性选取经验值。各部分参数取值情况见表 2。

因模型四周与底面为人为截断边界,考虑到边界效应的影响,模型总长度取圆形筏板基础半径的 6 倍,高度取基础高度的 5 倍。计算过程中模型侧立面施加法向约束,底面施加三向约束,地面为自由边界,混凝土顶面立柱处施加竖向荷载,根据风机上部结构自重,最大竖向荷载取 12 187 kN。

数值计算过程中考虑到不同材料界面的错动和滑移效应,尤其是混凝土基础与回填土、混凝土基础与褥垫层等界面的滑移问题,研究中引入接触面

表 1　数值计算方案

工况编号		洞穴几何特征	洞穴埋深/m	洞穴距基础中心水平距离/m
埋深	D1	直径 4 m 圆	1	0
	D2	直径 4 m 圆	3	0
	D3	直径 4 m 圆	5	0
位置	L1	直径 4 m 圆	1	1
	L3	直径 4 m 圆	1	7
	L5	直径 4 m 圆	1	16
形状	R-4-1	水平 4 m 椭圆	1	0
	R-4-2	水平 4 m 椭圆	1	0
	R-4-3	水平 4 m 椭圆	1	0
	R-1-4	竖轴 4 m 椭圆	1	0
	R-2-4	竖轴 4 m 椭圆	1	0
	R-3-4	竖轴 4 m 椭圆	1	0

模型(Interface)来表征界面效应问题(图 3)。计算过程中对两处界面分别建立接触面模型,相应的计算参数主要包括法向接触刚度、切向接触刚度、黏聚力、内摩擦角等,参数取值根据材料特性选用经验值(表 3)。

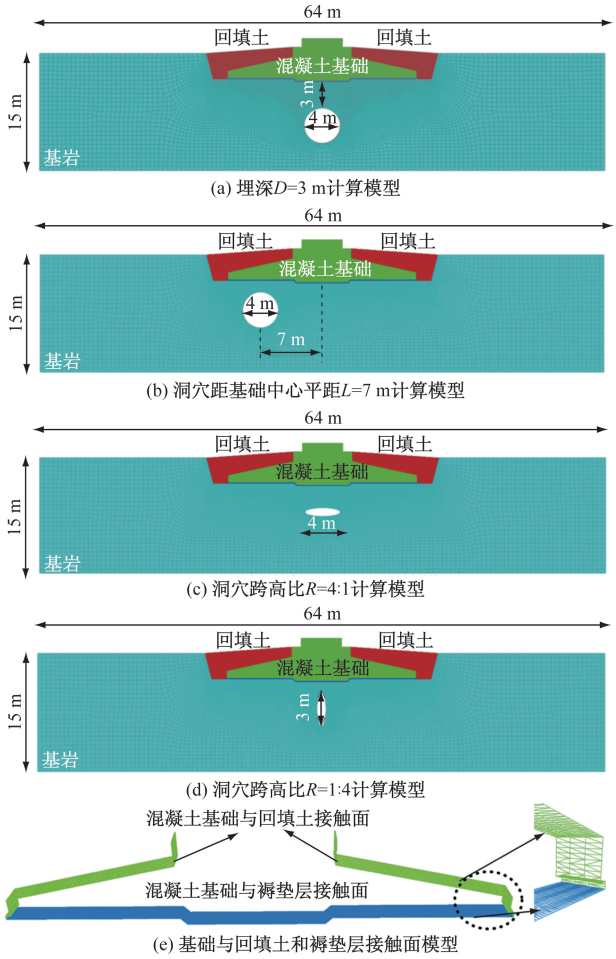


图 3　数值计算模型

表 2　数值计算参数

材料类型	重度/(kN·m^{-3})	体积模量/Pa	剪切模量/Pa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
基础	25	2.35×10^{9}	6.85×10^{8}	—	—
回填土	18	5.50×10^{7}	3.50×10^{7}	25	30
褥垫层	20	2.50×10^{8}	8.65×10^{7}	35	60
基岩	25	1.20×10^{9}	5.80×10^{8}	300	40

表 3　接触面参数

材料类型	法向刚度/Pa	切向刚度/Pa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
混凝土基础与回填土接触面	5.00×10^{8}	5.00×10^{8}	20	15
混凝土基础与褥垫层接触面	1.00×10^{9}	1.00×10^{9}	30	20

2　隐伏岩溶洞穴埋深影响分析

根据现场调查及风机基础开挖揭露的隐伏岩溶洞穴埋深情况,主要考虑隐伏溶洞顶板距离基础底面高度分别为 1、3、5 m 的情形,分别对应浅、中、深埋深情况。对于隐伏溶洞对风机基础稳定性影响,这里主要考虑竖向荷载作用下基础底面和洞穴顶板的竖向变形大小及分布特征。

图 4 所示为隐伏洞穴不同埋深条件下混凝土基础及下伏地基竖向变形分布特征。整体而言,在以竖向荷载为主的加载条件下,混凝土筏板基础变形最为集中,且主要集中在立柱以下区域,最大值为 2.3～2.5 mm,以立柱为中心向两侧逐渐递减;隐伏洞穴下伏深度对基础变形分布和变形量值影响较小,对地基岩体变形范围和量值影响较大,变形范围以洞穴为中心呈近似对称分布。

为分析洞穴不同埋深条件下混凝土基础与地基岩体特征点变形情况,提取了模型左侧立面至基础中心不同深度处竖向变形分布曲线,如图 4 所示。以地面(深度 $H=0$ m)为竖向起始位置,向地面以下每隔 1 m 增加一处监测点。本研究主要关注隐伏洞穴及以上区域变形特征,故选取地面以下 9～15 m 范围内的特征点进行监测。水平方向以模型中心位置为起点(距离为 0 m),至模型左侧立面为最远点(距离为 31.8 m),每隔 0.5 m 标记一个监测点。

如图 5 所示,$H=3$ m 以上区域监测曲线主要反映混凝土基础、回填土和基础两侧岩体变形,基本不随深度增加而变化,最大变形量集中在基础中心位置。在基础边缘处竖向变形逐渐趋于 0,在基础以外区域地表以下 3 m 内地基土竖向变形趋于恒定值,呈现出略微抬升的特征。这主要由于基础受载下沉引起两侧地基岩体隆升的影响。对于隐伏洞穴顶板以上区域,当埋深较小时,其竖向变形较大,且基础中心正下方位置变形量明显大于两侧区域,如隐伏洞穴埋深为 1 m 时,基础正下方洞穴顶板变形量约 1.75 mm,两侧变形降至约 1.15 mm,洞穴中心底板位置竖向变形约 0.21 mm,洞穴变形主要表现为顶部向洞内的收敛。此外,隐伏洞穴顶板以上区域竖向变形量随洞穴埋深增加而降低,但埋深大于 3 m 时,变形增量不显著。

为比较隐伏洞穴埋深对混凝土基础以下岩体变形的影响,得到基础中心位置地面至地下 9 m 范围内竖向变形随埋深变化曲线(图 6)。由图 6 可知,基础埋深范围内,基础整体变形特征显著,基本

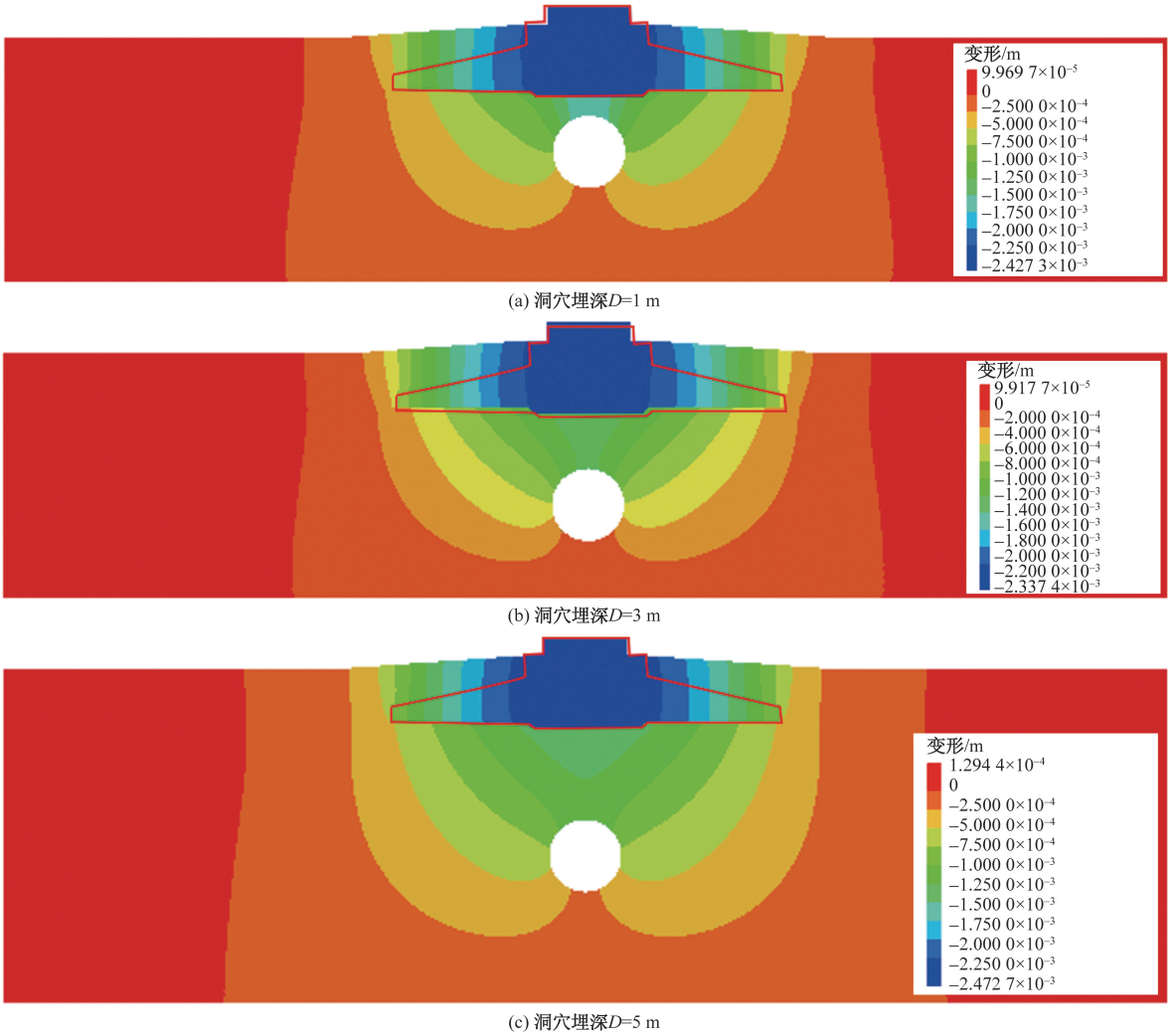


图 4　隐伏洞穴不同埋深条件下竖向变形云图

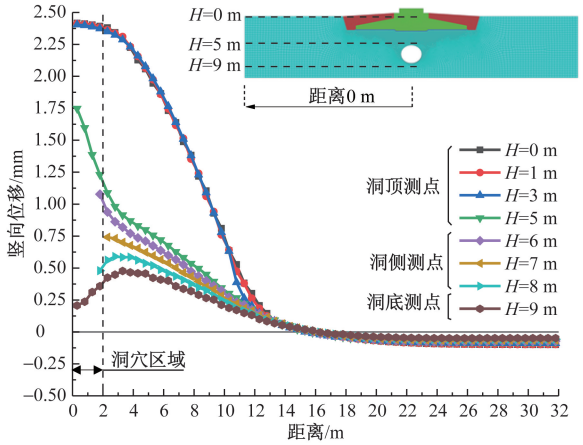
不随深度增加而变化。基础底面至隐伏洞穴顶板范围内,竖向变形随深度增加呈减小趋势,且洞穴埋深越大减小趋势越明显,但竖向变形量在洞穴顶面位置表现为突增现象,隐伏洞穴埋深越浅,突增现象越显著。这主要是洞穴埋深较小时洞顶位置向洞内临空侧收敛变形引起的。

3　隐伏岩溶洞穴形状影响分析

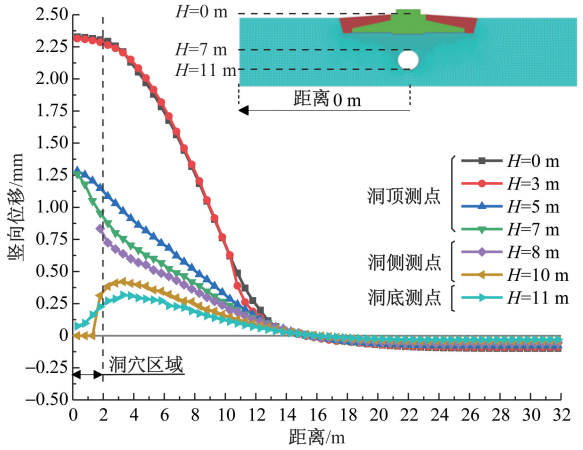
不同洞穴形状条件下风机筏板基础及地基竖向变形分布如图 7 所示。整体而言,当基础顶部作用竖向荷载时,竖向变形主要集中在荷载作用范围内,并从基础中心向模型两侧逐渐减小。随着隐伏洞穴形态由圆形向扁平化转变[图 7(c)→图 7(a)],混凝土基础竖向变形最大量值变化不大,仍维持在 2.5 mm 左右,但最大值分布范围则越来越向基础中心部位靠拢,呈现出向中心冲切破坏发展的现象。基底以下岩体则随隐伏洞穴向扁平化过度而显著增大,且扁平化程度越高,隐伏洞穴顶面竖向变形越大。当隐伏洞穴跨度与高度比值 R=4∶3时,洞穴顶面竖向变形最大值,约为 2.34 mm;R=4∶2时,洞穴顶面竖向变形最大值为 2.49 mm;R=4∶1时,洞穴顶面竖向变形最大值约为 3.66 mm。此外,洞穴顶板以上地基岩体竖向变形呈现进一步集中现象,最大变形量同样向基础中心正下方集中。

当隐伏洞穴由圆形向竖向裂缝型发展时[图 7(f)→图 7(b)],基础在竖向受荷条件下最大竖向变形变化较小,如 R=1∶4时,基础最大竖向变形约为 2.2 mm,R=2∶4时,基础最大竖向变形约为 2.24 mm,R=3∶4时,基础最大竖向变形约为 2.29 mm。隐伏洞穴上覆岩体地基均未出现显著的局部变形集中现象,窄缝形和近圆形洞穴基底以下岩体竖向变形场均匀度高于其过渡型[图 7(e)]。

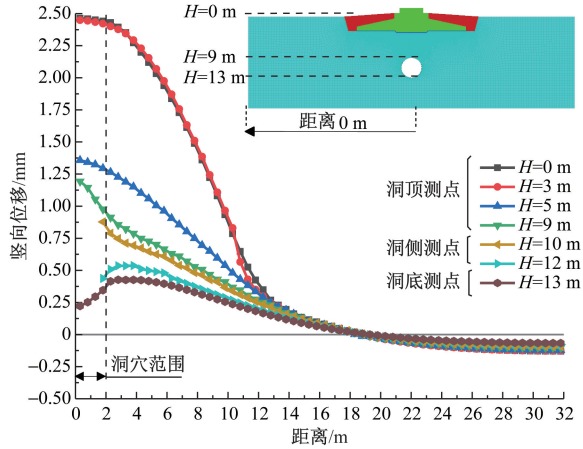
因此,就竖向变形分布特征和量值而言,扁平形隐伏洞穴对上覆地基和基础稳定性最为不利,且扁平化程度越高,地基和基础竖向变形越大;近圆



(a) 洞穴埋深D=1 m



(b) 洞穴埋深D=3 m



(c) 洞穴埋深D=5 m

图 5　不同洞穴埋深下基础不同深度竖向位移

形隐伏洞穴受力条件最好，基础及地基竖向变形分布均匀度最大。

为进一步了解隐伏洞穴形状对基础及地基特征点变形规律的影响，分别提取了地面以下不同深度处竖向变形与偏离基础中心距离的关系曲线，如图 8、图 9 所示。

在基础深度范围内，隐伏洞穴形状对基础和回填土竖向变形影响较小，变形量基本不随洞穴形状

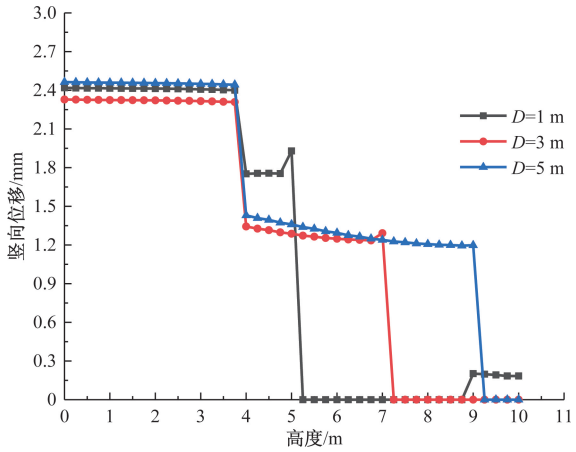
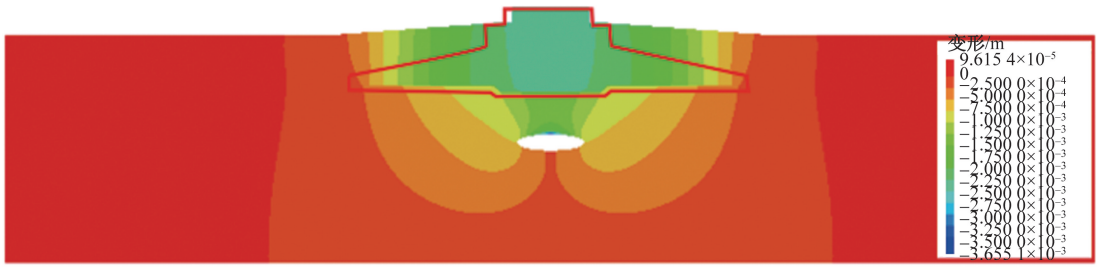


图 6　不同洞穴埋深条件下基础中心不同深度处竖向变形

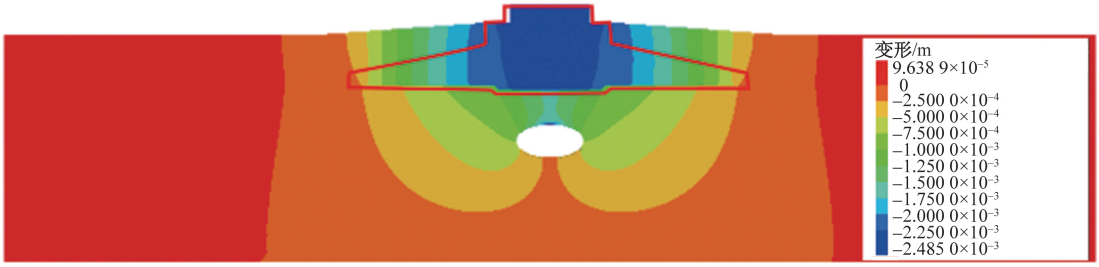
而改变，均表现为基础受力区域竖向变形最大，回填土部分次之，基础外侧地基岩体变形最小，趋近于 0。图 8(a)中 H=6 m 所对应的变形曲线实为洞穴顶板以上约 0.5 m 处的竖向变形，最大值约为 1.61 mm，而洞穴顶板最大变形量约为 3.65 mm。由此可见，扁平形隐伏洞穴顶板初次变形破坏范围较小，但初次垮塌后会引起洞壁应力调整，导致垮塌范围进一步扩张。对于图 8(b)中 H=6 m 的情形，该竖向变形监测点正好位于洞穴顶板处，最大变形量约为 2.47 mm。

对于竖向裂隙型隐伏洞穴，随着洞穴高跨比减小，隐伏洞穴顶板位置竖向变形呈增加趋势，如图 9(a)中的窄缝形洞穴，其顶板最大竖向变形约为 1.15 mm，而图 9(c)中的近圆形裂缝，其顶板最大位移约为 1.5 mm，即隐伏洞穴跨度越小，顶板变形越小，洞穴围岩及基础也越稳定。

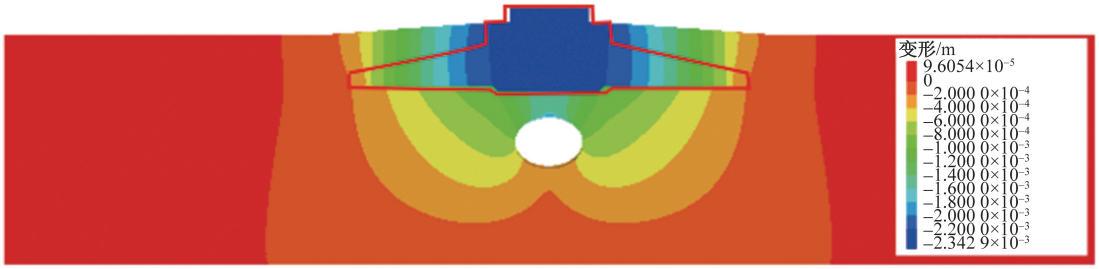
图 10 所示为基础中心位置自地面向下不同深度处竖向变形随深度变化曲线。图 10(a)为扁平形隐伏洞穴对应的变形曲线，图 10(b)为竖向裂缝型隐伏洞穴对应的变形曲线。为了保证数据比较的完整性，分别加入了相同深度规则圆形洞穴的变形曲线。对于具有相同跨度的隐伏洞穴，隐伏洞穴高度对基础竖向变形影响较小，对基底岩体竖向变形影响较大，且高度越小影响越大。随着隐伏洞穴跨高比逐步减小，隐伏洞穴顶板竖向变形显著增长，且顶板竖向变形随深度变化逐渐由均衡变化向骤变过渡。例如，隐伏洞穴跨高比为 4∶1的情形，基底竖向变形约为 1.51 mm，而洞穴顶板竖向变形约为 3.62 mm；对于规则圆形洞穴，基底竖向变形与洞穴顶板竖向变形差异较小，差值约为 0.25 mm。这说明跨高比越大，洞穴顶板变形集中程度越高，发生顶



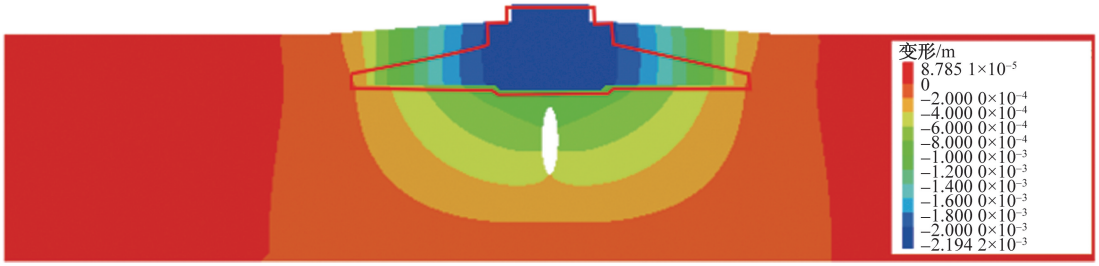
(a) 隐伏洞穴跨高比R=4:1



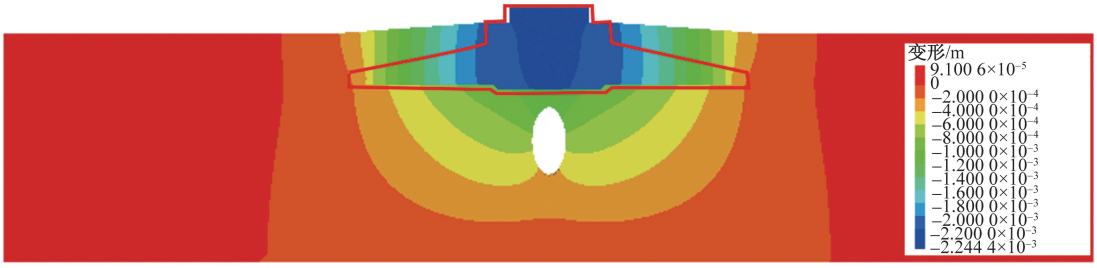
(b) 隐伏洞穴跨高比R=4:2



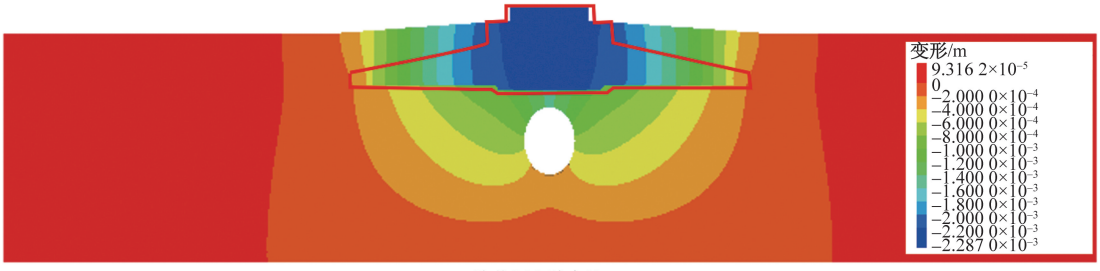
(c) 隐伏洞穴跨高比R=4:3



(d) 隐伏洞穴跨高比R=1:4

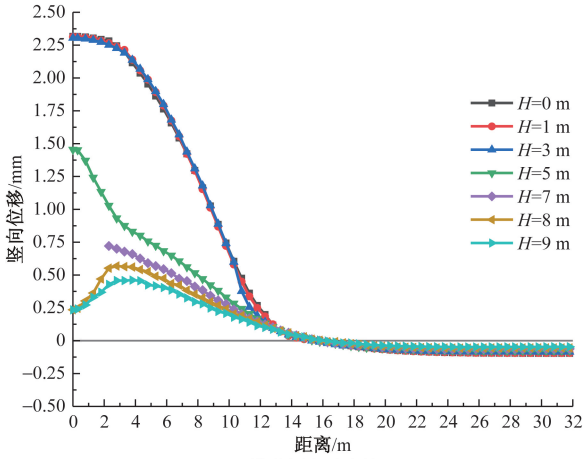


(e) 隐伏洞穴跨高比R=2:4

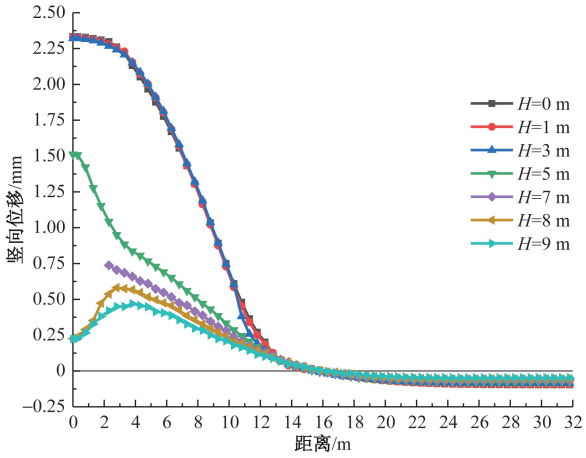


(f) 隐伏洞穴跨高比R=3:4

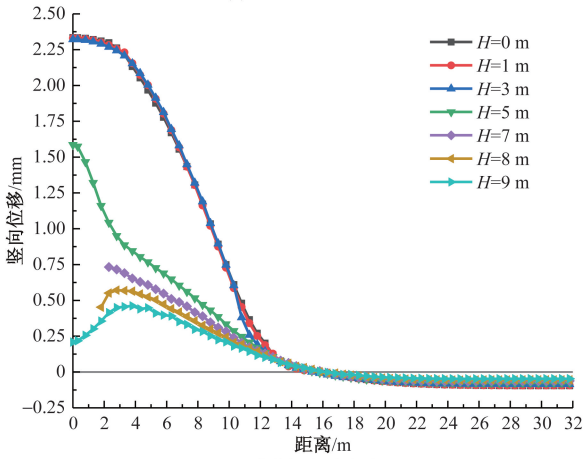
图 7　不同洞穴形状下地基基础竖向变形分布



(a) 隐伏洞穴跨高比R=4∶1

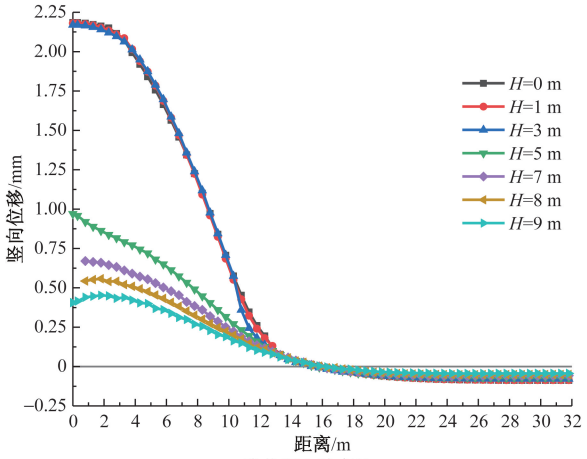


(b) 隐伏洞穴跨高比R=4∶2

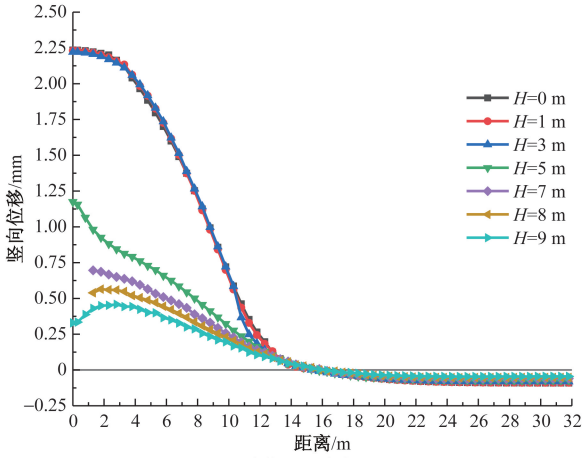


(c) 隐伏洞穴跨高比R=4∶3

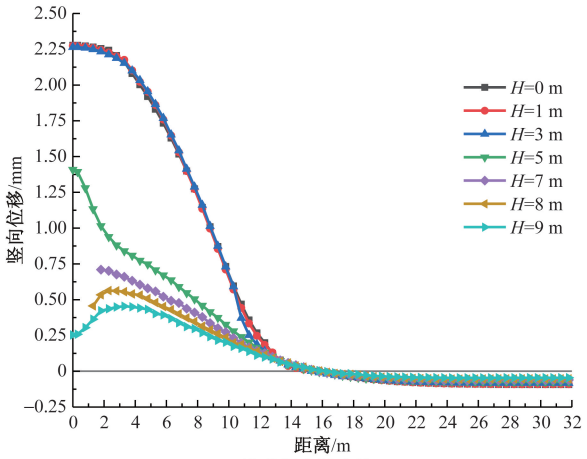
图 8　不同扁平形洞穴地基基础特征点竖向变形曲线



(a) 隐伏洞穴跨高比R=1∶4



(b) 隐伏洞穴跨高比R=2∶4



(c) 隐伏洞穴跨高比R=3∶4

图 9　不同裂隙形洞穴地基基础特征点竖向变形曲线

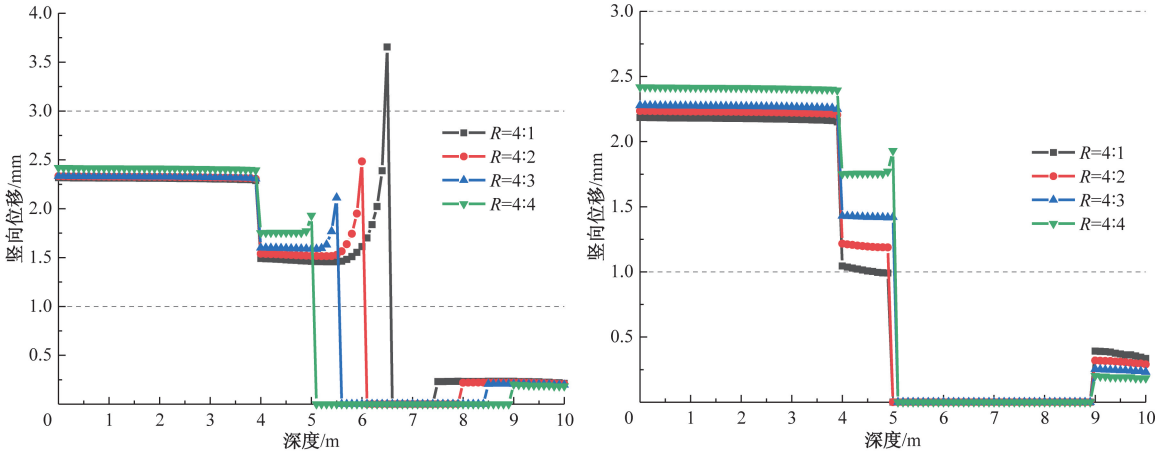
板垮塌的可能性越大。当隐伏洞穴跨高比小于 4∶2 时，洞穴顶板竖向位移不超过基础竖向位移。

对于竖向裂隙型隐伏洞穴，洞穴高度相同，横向跨度分别取高度的 1/4、1/2、3/4。随着隐伏洞穴跨度增加，基础竖向沉降呈现增长趋势，减小跨度可以适当减小基础竖向沉降。对于洞穴顶板位置，洞穴跨度对顶板竖向变形减小趋势更加显著，如洞穴跨高比为 1∶4 时，顶板最大竖向变形约为 1.01 mm，而规则圆形洞穴顶板竖向最大变形约为 1.75 mm。与扁平形隐伏洞穴相比，窄缝形洞穴顶板竖向变形均小于基础竖向变形，说明窄缝形隐伏洞穴基岩稳定性好。

4　隐伏岩溶洞穴位置影响分析

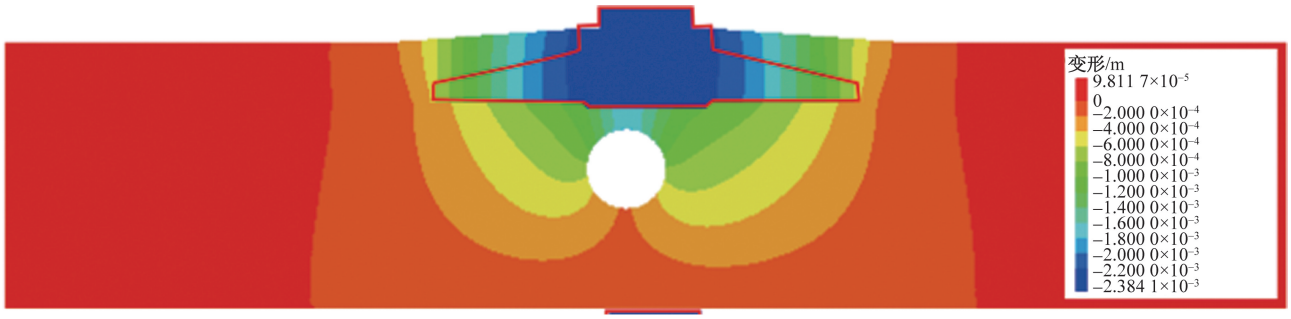
为剖析风机筏板基础与下方隐伏洞穴空间位

置关系对筏板基础及地基变形的影响,考虑隐伏洞穴位于基础底面以下 1 m 的情况,分别建立 3 个计算模型,即隐伏洞穴距离基础中心水平距离 L 为 1,7,16 m 的情形。图 11 所示为隐伏岩溶洞穴与筏板基础不同空间位置条件下基础与地基变形分布情况。整体而言,在竖向荷载作用下,主要变形仍集中在集中受力范围内,且竖向变形在基础深度范围内基本不变,基础两侧变形随远离中心而递减。

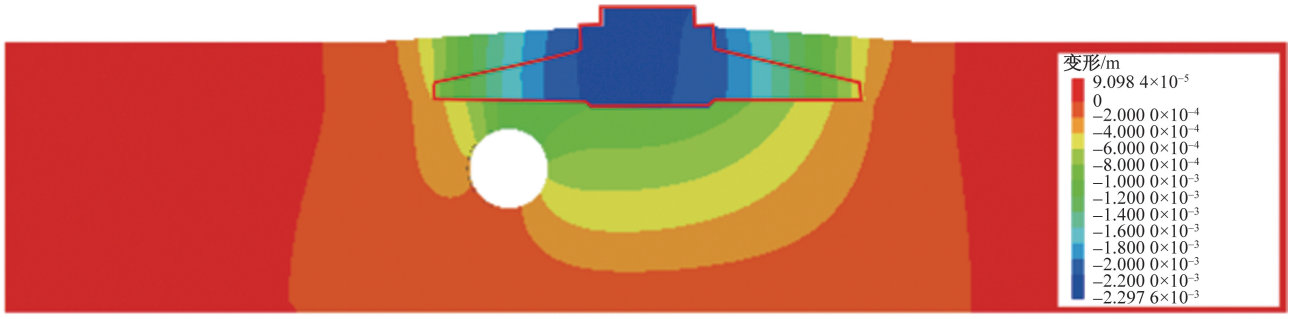


(a) 扁平形隐伏洞穴　　(b) 裂缝形隐伏洞穴

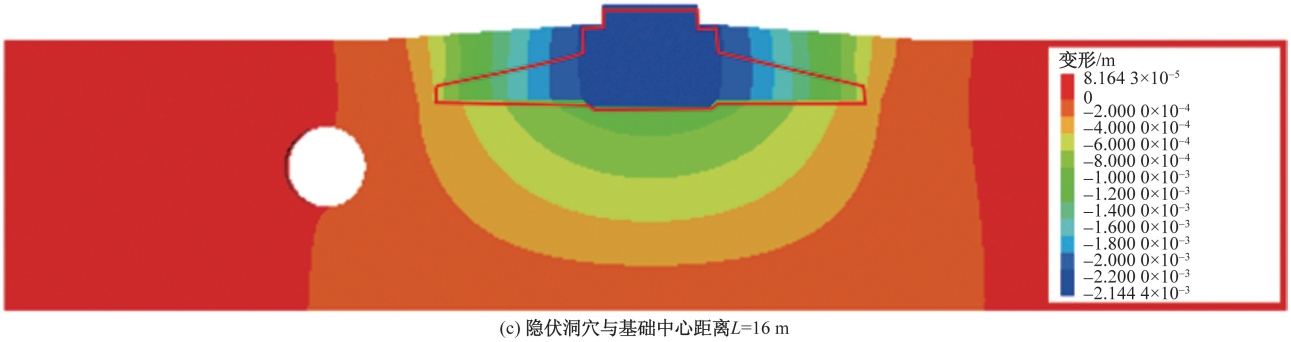
图 10　洞穴形状对基础中心位置竖向变形影响曲线



(a) 隐伏洞穴与基础中心距离L=1 m



(b) 隐伏洞穴与基础中心距离L=7 m



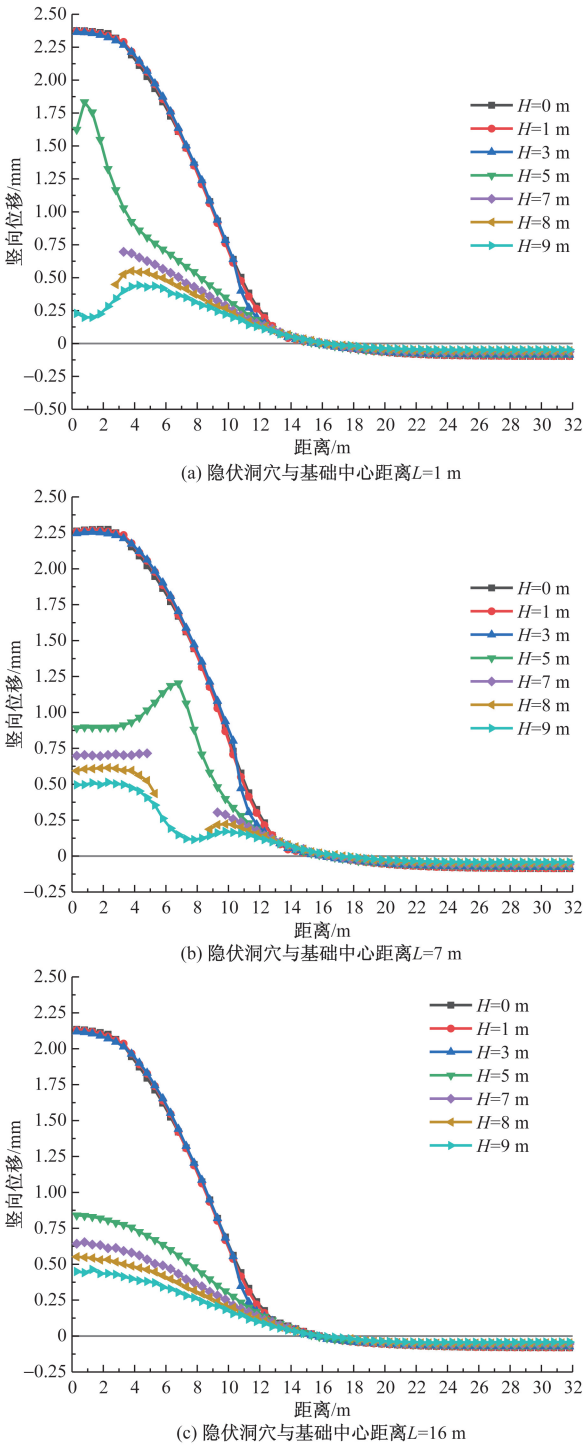
(c) 隐伏洞穴与基础中心距离L=16 m

图 11　隐伏洞穴不同位置下竖向变形分布云图

对于隐伏洞穴水平位置的影响，随着隐伏洞穴逐步偏离基础中心，基础中心位置和隐伏洞穴顶板位置最大变形逐渐增加，隐伏洞穴位于基础中心下方时，基础最大变形为 2.38 mm；隐伏洞穴位于基础一侧正下方时，基础最大变形为 2.30 mm，最大变形位于基础中心；隐伏洞穴位于基础外侧边缘时，基础最大变形为 2.14 mm，位于基础中心位置。此外，当隐伏洞穴位于基础中心或基础外缘区域时，基础受力部分变形分布较均匀，而当隐伏洞穴位于基础一侧正下方时，基础受力区域竖向变形出现非对称分布，存在变形差值。

图 12 为岩溶洞穴不同位置条件下混凝土基础和地基特征点竖向变形曲线。整体而言，地基竖向变形由基础中心向模型边缘逐渐减小，并在外侧距离基础边缘约 1 倍基础半径时趋近于恒定值。地面及以下 3 m 范围内变形最为显著，且地基直接受力部位变形最大，向基础中心两侧逐渐减小。基础两侧回填土竖向变形，从靠近受力侧向基础边缘线性减小，二者差值约 2 mm。基础最大变形量随隐伏洞穴远离基础中心正下方而减小。当隐伏洞穴位与基础中心水平距离 $L=1$ m 时，基础最大竖向变形量约为 2.38 mm；$L=7$ m 时，基础最大竖向变形量为 2.25 mm；$L=16$ m 时，基础最大竖向变形量为 2.13 mm。隐伏洞穴顶板以上区域，地基竖向变形量同样随隐伏洞穴远离基础中心而减小，且减小趋势显著于混凝土基础。$L=1$ m 时，隐伏洞穴顶板最大竖向变形约 1.88 mm；$L=7$ m 时，最大竖向变形约 1.26 mm；$L=16$ m 时，洞穴顶板变形不受其位置影响。

图 13 所示为基础顶面以下不同深度处竖向变形。在基础深度范围内，竖向变形基本不随深度增加而增加，表明混凝土基础整体变形特征较好，不存在分层沉降差。当隐伏洞穴位于基础正下方，基础底面竖向变形明显大于隐伏洞穴位于基础侧边正下方及基础边缘以外区域的情形，即基础底面地基竖向变形值随隐伏洞穴远离基础中心而显著降低。



(a) 隐伏洞穴与基础中心距离L=1 m

(b) 隐伏洞穴与基础中心距离L=7 m

(c) 隐伏洞穴与基础中心距离L=16 m

图 12　岩溶洞穴水平位置影响下特征点竖向变形曲线

5　结论

(1)在洞穴形状和尺寸固定情况下，洞穴顶板竖向变形量随隐伏洞穴埋深增加而减小，洞穴顶面竖向变形量突增现象随埋深减小而弱化，当洞穴顶面距离基础地面深度超过基础埋深时，洞穴埋深对顶板竖向变形影响不显著。因此，岩溶洞穴区，风机基础底面至隐伏洞穴顶面的安全距离应为 1 倍以上的基础埋深。

(2)隐伏洞穴跨度对风机基础及地基稳定性影响最为显著，大跨度的扁平形隐伏洞穴对基础稳定最为不利，而竖向裂隙形的隐伏洞穴对基础稳定最有利。对扁平形隐伏洞穴，其形状越接近规则的圆形，风机基础及地基稳定性越好；对于竖向裂缝型洞穴，其跨度越小，风机基础及地基稳定性越好；相

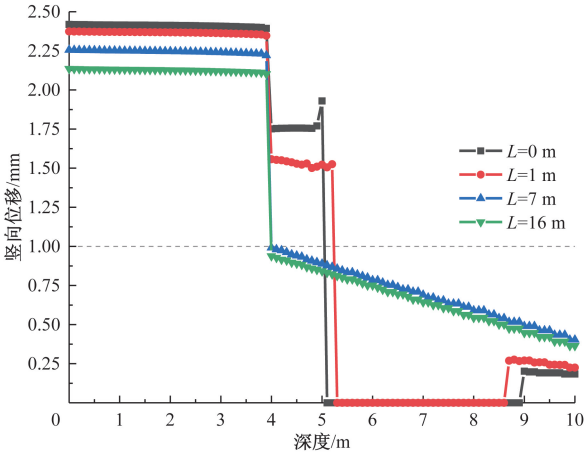


图 13　不同洞穴位置下基础中心特征点竖向变形曲线

同规模条件下,裂缝型洞穴比扁平形洞穴更有利于地基和基础稳定。

(3)在隐伏洞穴形状和埋深固定情况下,风机筏板基础及地基竖向变形随隐伏洞穴远离基础中心而减小,在筏板基础边缘以外约 1 倍筏板半径时达到恒定值。当隐伏洞穴位于筏板基础边缘以外区域时,风机基础及基底地基竖向变形显著降低,发生不均匀沉降和顶板塌陷的可能性非常小。建议在布置风机基础时,尽量将其布置在隐伏洞穴边界外,实在无法避让时,应尽可能使隐伏洞穴远离基础中心位置。

参考文献

[1] 符策简. 岩溶地区隐伏溶洞顶板稳定性及变形分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 288-291, 296.

[2] 张健, 冯旭亮, 岳想平. 综合物探方法在隐伏岩溶探测中的应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(6): 1403-1410.

[3] 冼诗盛. 地下洞穴探测的物探方法[J]. 中国科技信息, 2014(22): 51-53.

[4] PASIERB B, GAJEK G, URBAN J, et al. Integrated geophysical and geomorphological studies of caves in calcarenite limestones (Jaskinia pod Świecami Cave, Poland)[J]. Surveys in Geophysics, 2024, 45(3): 663-694.

[5] 刘动, 林沛元, 李伟科, 等. 跨孔 CT 岩溶识别方法准确性的统计学评价[J]. 岩土力学, 2024, 45(3): 822-834, 926.

[6] 许韬, 彭功勋, 柳杰, 等. 岩溶地区跨孔地震波 CT 探测误差与孔距关系[J]. 中山大学学报(自然科学版)(中英文), 2022, 61(1): 105-111.

[7] 代方园, 高扬, 宿庆伟, 等. 瞬变电磁与跨孔 CT 成像探测岩溶分布及形态特征的应用: 以山东省济南地区为例[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 308-317, 328.

[8] 胡富彭, 欧元超, 付茂如. 不同充填介质下的溶洞跨孔电阻率 CT 探查数值模拟[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5): 766-773.

[9] 孙康. 微动瑞利面波法在地下洞穴探测中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.

[10] 武睿凯. 数字化面波仪在洞穴探测中的试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

[11] 何大鹏, 杨双安, 郑培寅. 多道瞬态面波在地下洞穴探测中的应用研究[J]. 能源与环保, 2015, 37(7): 111-113, 117.

[12] 张湘桂, 邹明, 刘宗辉, 等. 隧道衬砌后方隐伏洞穴地质雷达响应特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(5): 1598-1605.

[13] CERU T, SEGINA E, KNEZ M, et al. Detecting and characterizing unroofed caves by ground penetrating radar[J]. Geomorphology, 2018, 303: 524-539.

[14] LAN R Y, LIU Z H, LIU M M, et al. Detection of karst caves during tunnel construction using ground-penetrating radar and advanced drilling: a case study in Guangxi Province, China[J]. Near Surface Geophysics, 2022, 20(3): 265-278.

[15] CASELLE C, BONETTO S, COMINA C, et al. GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103137.

[16] WU W, LIU X, GUO J, et al. Upper limit analysis of stability of the water-resistant rock mass of a Karst tunnel face considering the seepage force[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(7): 5813-5830.

[17] ZENG Z, WU S, LÜ C. Upper bound analysis of active and passive mechanisms of intermediate rock wall between two adjacent pressurised cavities[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 159: 105423.

[18] 李坤, 段志, 郭德平, 等. 不同方位隐伏溶洞对隧道衬砌结构受力特性的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(S1): 74-85.

[19] XIA C Z, SHI Z M, KOU H J, et al. Sensitivity analyses of random cave groups on karst tunnel stability based on water-rock interaction using a novel contact dynamic method[J]. Underground Space, 2024, 18: 162-186.

[20] 杨秀竹, 雷金山, 阳军生, 等. 岩溶区地铁隧道相似模拟试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(4): 40-45.

[21] 谢朋. 灰岩地层浅埋隐伏溶洞三维识别重构及顶板承载力研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[22] 陈禹成, 王朝阳, 郭明, 等. 隐伏溶洞对隧道围岩稳定性影响规律及处治技术[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(5): 33-43.

[23] 曹林卫, 黄明利, 杨泽, 等. 隧道与溶洞间复合围岩抗水压能力数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3349-3357.

[24] 刘磊, 郑勇, 张增. 顶部既有溶洞对隧道围岩稳定性影响的数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(S1):

86-95.
[25] 张京亮，夏志杰，刘新荣，等. 隐伏溶洞影响下隧道开挖稳定性数值模拟分析[J]. 科学技术与工程，2022，22(13)：5455-5462.

Analysis of Fan Foundation Deformation Based on Concealed Karst Cave Characteristics

WANG Xiuru[1]，PAN Weijie[1]，CHEN Sheng[1]，SHEN Yunshan[1]，HUANG Xingyi[1]，LI Dongdong[2]
(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited，Hangzhou 311122，China；
2. College of Earth Science and Engineering，North China University of Water Resources and Electric Power，Zhengzhou 450045，China)

Abstract：The concealed Karst caves in the carbonate distribution areas are one of the important factors restricting the construction and safe operation of wind power facilities. Therefore，it is urgent to clarify the impact of the characteristics of concealed Karst caves on the deformation and stability of the fan foundation，so as to provide scientific and technical support for the site selection of wind power clean energy production in Karst areas. Field investigation and geological exploration were conducted on a wind farm in Wenshan Prefecture，Yunnan Province to clarify the development characteristics of the Karst phenomena. Then，numerical analysis was performed to investigate the influence of Karst cave characteristics，such as depth，layout and shape，on the deformation of the fan foundation and overlying rock mass. The results show that the Karst phenomena such as stone bud，dissolution trough and Karst cave are the main phenomena observed in the study area，where the concealed Karst cave has high concealment. The concealed depth，spatial position and shape affect the deformation and damage characteristics of the foundation. The distance between the base of the fan foundation and the roof of the concealed cave should be kept more than 1 times the buried depth of the foundation，and the distance between the foundation center and the concealed cave center should be increased as far as possible. When the Karst cave cannot be avoided，the fissure type Karst cave is preferred to avoid placing the fan foundation on the flat type Karst cave.

Keywords：concealed Karst cave；fan foundation；deformation behavior；site optimization