

关于采空区地表变形对桥梁影响的研究

于玲¹,丁冬玲¹,许晨阳²,包龙生¹

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省公路勘测设计公司, 辽宁 沈阳 110002)

摘要 以二龙山1号高架桥为研究背景,研究既有采空区所引起的地表沉降以及沉降对已建桥梁的影响。**方法** 结合数值模拟分析,拟定不同的采空区情况(采空区半径、采空区空洞高度、采空区顶板埋深、顶板弹性模量),分析在自重及附加桥梁荷载作用下,地表沉降规律以及地表沉降对已建桥梁的影响。**结果** 地表沉降最大值与采空区半径大小、采空区空洞高度呈正相关;地表沉降最大值与采空区顶板埋深、采空区顶板岩层弹性模量呈负相关;结合相邻墩台最大沉降差的要求,在实际工程中,采空区半径小于60 m、采空区埋深大于55 m、采空区空洞高度小于1 m、桥梁正下方岩层弹性模量大于2 000 MPa,理论上可以不进行处治。**结论** 采空区半径越小,顶板埋深越大,空洞高度越小,顶板岩层弹性模量越大,采空区地表变形越小,对已修建桥梁影响越小。

关键词 采空区;地表变形;数值模拟;桥梁

中图分类号 U445.4

文献标志码 A

引用格式:于玲,丁冬玲,许晨阳,等.关于采空区地表变形对桥梁影响的研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):894-903. (YU Ling, DING Dongling, XU Chenyang, et al. Study on the impact of surface deformation on bridges in the mining area based on numerical simulation method [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(5):894-903.)

Study on the Impact of Surface Deformation on Bridges in the Mining Area Based on Numerical Simulation Method

YU Ling¹, DING Dongling¹, XU Chenyang², BAO Longsheng¹

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Liaoning Highway Survey and Design Company, Shenyang, China, 110002)

Abstract: This paper takes the Erlongshan No. 1 viaduct as the research background to study the surface settlement caused by the existing quarrying hollow area and the effect of settlement on the proposed bridge. Combined with numerical simulation analysis, this paper formulates the surface

收稿日期:2023-10-02

基金项目:国家自然科学基金项目(42202319);沈阳市科技计划项目(23-407-3-19);辽宁省博士启动基金项目(2021-BS-168)

作者简介:于玲(1970—),女,教授,主要从事桥梁工程结构等方面研究。

settlement pattern and the effect of surface settlement on the proposed bridge under the action of self-weight and additional bridge loads for different hollow areas (hollow area radii, hollow area cavity heights, hollow area roof depths, and roof elastic modulus). The results show that: the maximum value of surface settlement is positively correlated with the size of the radius of the extraction zone and the height of the cavity of the extraction zone, and the maximum value of surface settlement is negatively correlated with the depth of the top plate of the extraction zone and the modulus of elasticity of the top plate; in combination with the requirement of the maximum settlement of the adjacent piers, the bridge will be built in the actual project with the following results: the maximum settlement of the bridge is the same as the maximum settlement of the bridge. Combined with the requirements of the maximum settlement difference of adjacent piers, under certain conditions in actual engineering, the radius of the goaf is less than 60 m, the buried depth of the goaf is greater than 55 m, the height of the goaf cavity is less than 1 m, and the elastic modulus of the rock formation directly below the bridge is greater than 2 000 MPa, which can theoretically not be treated. The smaller the radius of the goaf, the larger the buried depth of the roof, the smaller the height of the cavity, the greater the elastic modulus of the roof rock layer, and the smaller the surface deformation of the goaf, the smaller the impact on the built bridge.

Key words: air-mining area; surface deformation; numerical simulation; bridge

随着我国桥梁建设的发展,造桥技术取得了较大成就,然而采空区桥梁建设一直是研究难题。采空区由于地质情况复杂,分布情况毫无规律,对桥梁的施工存在着较大的威胁,如何合理地改善采空区施工条件,掌握采空区地表变形规律,成为工程技术人员的一个难题。

国外对于采空区变形的研究起步较早,且发展迅速。L. J. Donnelly^[1]对地表沉陷进行调查,认为影响地表沉陷最主要的原因是断层倾角与工作面位置;R. P. Singh等^[2]提出了采空区上方岩层移动的形式为垮落带、断裂带和整体弯曲带的“三带理论”,并提出了典型曲线法计算地表移动变形;M. A. Coulthard等^[3]将数值模拟法引入开采沉陷计算之中,阐明了复杂非线性系统的响应,计算出煤矿开采后的地表沉陷;F. G. Bell等^[4]对开采年限久远的采空区进行研究,提出了可以采用液压填充物或水泥的方法,提高了采空区的稳定性;K. A. Sonia等^[5]通过对印度坎普提煤矿进行研究,采用GPR横断面与RI横断面演示的方法,对采空区覆盖层范围进行确定,并对采空区的沉降进行了预测;

A. Asadi等^[6]建立了剖面函数法,可预测采空区地表沉降变形;A. A. Baryarkh等^[7]考虑了时间因素,建立了动态地表沉降预计方法;K. B. Singh^[8]在地表沉陷形成机制方面进行研究,分析了预测方法的适用性;R. Hejmanowski等^[9]研究Knothe影响函数理论,并通过空间统计方法研究开采沉陷变形。

近年来,我国对于采空区的研究也取得了长足发展。康彦^[10]运用数值模拟方法,分析了采空区地表变形规律,并验证其准确性;贾瀚文等^[11]对于浅层采空区的稳定性问题,采用现场监测和数值模拟相结合的方法进行分析,通过调整蠕变参数进行结果预测;王飞飞等^[12]通过数值模拟分析得到了查干敖包铁锌矿塌陷区渐进发展情况;杨喆等^[13]采用数值模拟法对采空区地表变形进行预测;关军琪等^[14]应用FLAC软件模拟分析了不同充填方案对覆岩及地表变形规律的影响;杨振伟^[15]分析了采空区沉降、影响范围与有效程度,并对采空区铁路选线与路基加固技术进行了研究;还有许多学者对采空区也进行了研究^[16-19]。

综上所述,针对采空区引起的地表变形对桥梁的影响研究较少,笔者以采空区二龙

山1号高架桥为研究背景,通过 MIDAS-GTS NX 建立二龙山1号高架桥下土体模型,设定不同的采空区半径、采空区顶板埋深、采空区空洞高度及采空区顶板各岩层的弹性模量;采用数值分析方法,分析不同因素在不同情况下对采空区地表沉降的影响,以及对采空区已建桥梁墩台沉降的影响。研究表明,采空区半径、空洞高度越小,顶板埋深、顶板岩层弹性模量越大,采空区地表变形越小,对已修建桥梁影响越小。

1 采空区地表变形及稳定性评价方法

煤矿被开采后会形成采空区,现阶段常用的采空区稳定性评价方法有开采条件判别法、概率积分法、地表移动变形观测法、极限平衡分析法以及数值模拟法。开采条件判别法可以对巷柱式、不规则房柱式采空区进行稳定性评价,或用于难以计算出地表移动变形的采空区的稳定性评价,此方法只能对采空区进行定性评价。概率积分法是预计地表移动变形的常用方法,此方法需要根据地质条件选择合理的计算模型与参数,且参数获取较为复杂。地表移动变形观测法通常适用于长壁式和条带式采空区的稳定性评价,此方法虽然计算结果精确,但耗时较长。极限平衡分析法可以用来分析小采空区或者顶板岩层可以形成冒落拱的单一巷道采空区,此种方法过于理想化,计算结果往往与实际存在一定误差。数值模拟法适用于多层采空区,以及桥梁基础、隧道等重要工程穿越或压覆采空区等复杂工况下的采空区场地稳定性评价,此方法可以模拟较复杂的工程情况,且可以对各测点进行位移分析,耗时较短,是较常用的一种方法。综上所述,笔者选取数值模拟法对采空区进行分析。

2 工程概况

二龙山1号高架桥位于龙山屯西南侧约

1.0 km。路线起点桩号 K1668+246.5,路线终点桩号为 K1668+610。桥梁跨径组合为 12×30 m,桥梁宽 25.5 m,横纵断面见图 1、图 2 所示。桥梁上部结构为预应力混凝土简支箱梁,以柱式桥墩为下部结构,以柱式台、肋板台及钻孔桩为基础。

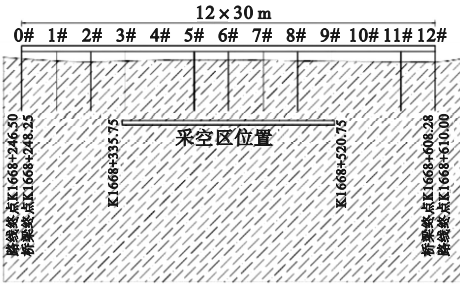


图1 纵断面布置图

Fig.1 The layout of profile

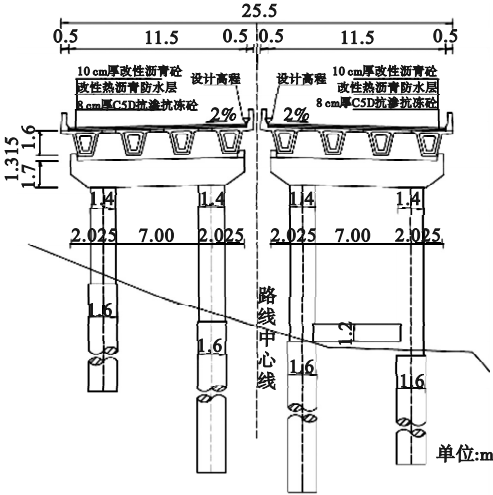


图2 横断面布置图

Fig.2 The layout of cross-section

3 模型参数选取

3.1 模型假定

为计算方便,以桥梁的中心为中心建立模型。为了控制变量简化计算做了如下假设:

- (1) 岩土体模型本构采用摩尔—库伦本构模型;
- (2) 桩土之间建立摩擦桩—土的界面模型模拟桩土间的相互作用以及滑移;
- (3) 拟定的采空区尺寸参考二龙山1号高架桥下的采空区,将模拟的采空区简化为圆形,直径为采空区长度 185 m;

(4)桥梁荷载等效以压力形式施加在盖梁上;

(5)不考虑土体渗流、固结以及地下水的作用。

模拟的土体模型长、宽、高分别为400 m、400 m 和 200 m。桥梁桥桩长 30 m,均在采空区上方未穿越采空区。桥墩高 8 m,6#墩的中心位于采空区中心。

表2 土体模拟基本参数

土层	弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	重力密度/ (kN·m ⁻³)
中风化砂岩	1 500	1 200	0.22	33.0	18.0
煤层	1 120	1 510	0.23	15.5	17.3
冒落带	50	40	0.22	33.0	18.0
微风化砂岩	2 250	1 300	0.21	32.0	19.0
微风化泥质砂岩	1 500	1 500	0.22	31.0	22.0

3.3 边界条件

桥梁纵向与模型 *x* 方向平行,桥梁横断面与 *y* 方向平行。边界条件上,模型底面为全固定约束边界,前后左右为水平位移约束边界,顶面为自由边界。

4 数值模拟结果分析

引起采空区地表变形的主要因素有采空区半径、采空区顶板埋深、采空区空洞高度及采空区顶板各岩层的弹性模量,因此,笔者将

3.2 材料参数

桥桩、桥墩、盖梁均采用 C30 混凝土,材料参数见表 1。中风化砂岩物理参数见表 2。

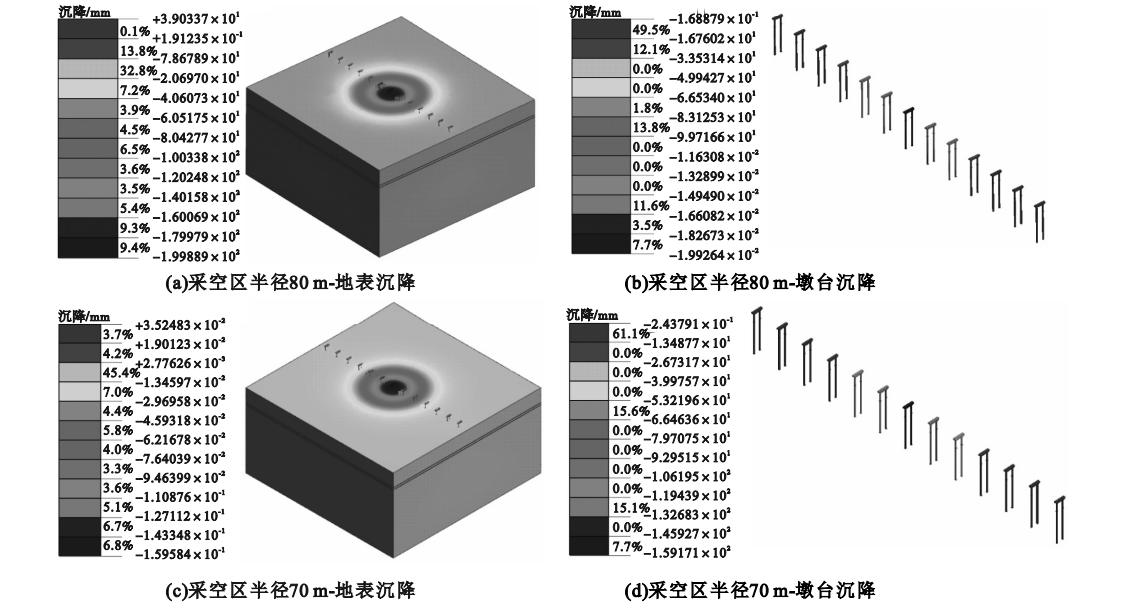
表1 钻孔灌注桩模拟基本参数

名称	重力密度/ (kN·m ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比 μ
C30	25	30 000	0.2

采取控制变量法对这 4 个因素设计模拟方案,并进行模拟分析。

4.1 采空区半径的影响分析

将采空区空洞高度设置为 5 m,采空区顶板埋深设置为 35 m,即顶板距模型底部 165 m 进行分析(以下同),分析采空区半径为 80 m、70 m、60 m 三种情况。沿桥梁纵向做一切面,在自重及桥梁荷载作用下分析三种工况的沉降情况,各工况沉降计算结果如图 3 所示。



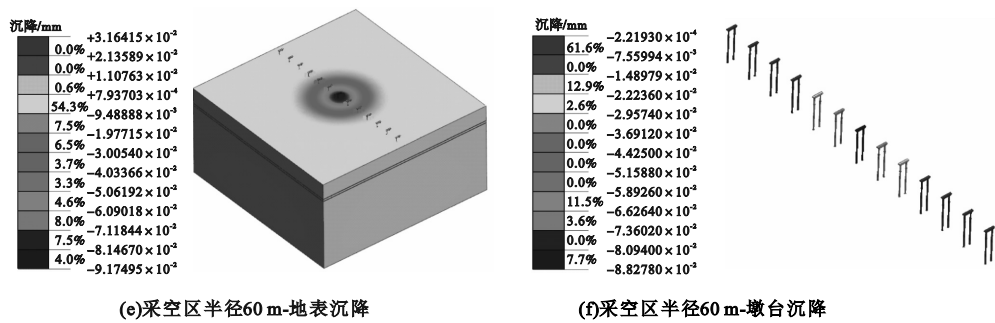


图3 不同半径的沉降云图

Fig.3 The sedimentation clouds with different radii

根据在自重及桥梁荷载作用下三种工况的沉降计算结果,绘制模型沿桥梁纵向地表的沉降变化曲线见图4;墩台沉降取盖梁上表面沉降,计算桥梁相邻墩台最大沉降差见图5。其中横坐标序列号1表示0#台与1#墩之间的沉降对比,序列号2表示1#墩与2#墩之间的沉降对比,依此类推,后文与此相同。

由图可知,①地表沉降最大值与采空区半径大小呈正相关,因此,采空区半径越大,上部岩层越不稳定,越靠近采空区中心部位越容易坍塌。②采空区半径为80 m、70 m和60 m时,地表最大沉降分别为192.78 mm、152.76 mm和82.65 mm。③采空区半径为80 m、70 m和60 m时,相邻墩台最大沉降差分别为79.01 mm、69.18 mm和41.85 mm,说明随着采空区半径尺寸的减小,相邻墩台最大沉降差也会随之减少,并且在采空区半径为60 m时满足《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[20]中的规定。对相邻墩台间因不同沉降在纵断面上引起的附加沉降折角不超过2‰(按30 m跨径计算相邻墩台最大沉降差不超过60 mm)。在该实际工程中的相同情况下,理论上对于半径小于60 m的采空区可以考虑不进行处理或者酌情处理。

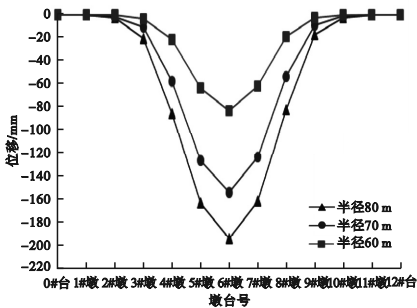


图4 不同半径下桥梁地表竖向位移

Fig.4 Vertical displacement of the bridge surface with different radii

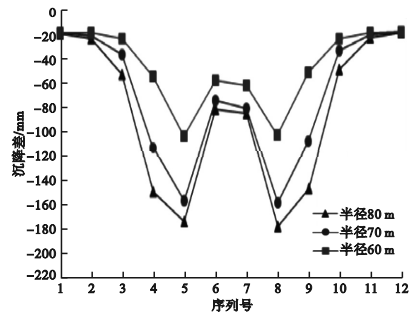


图5 不同半径下相邻墩台最大沉降差

Fig.5 The maximum settlement difference of adjacent piers with different radii

4.2 采空区顶板埋深的影响分析

将采空区半径设置为80 m,采空区空洞高度设置为5 m,分析顶板埋深在35 m、55 m和75 m三种情况,即顶板距模型底部165 m、145 m和125 m,各工况沉降计算结果见图6所示。

根据计算结果,绘制模型沿桥梁纵向地表沉降变化曲线见图7,桥梁相邻墩台最大沉降差见图8。

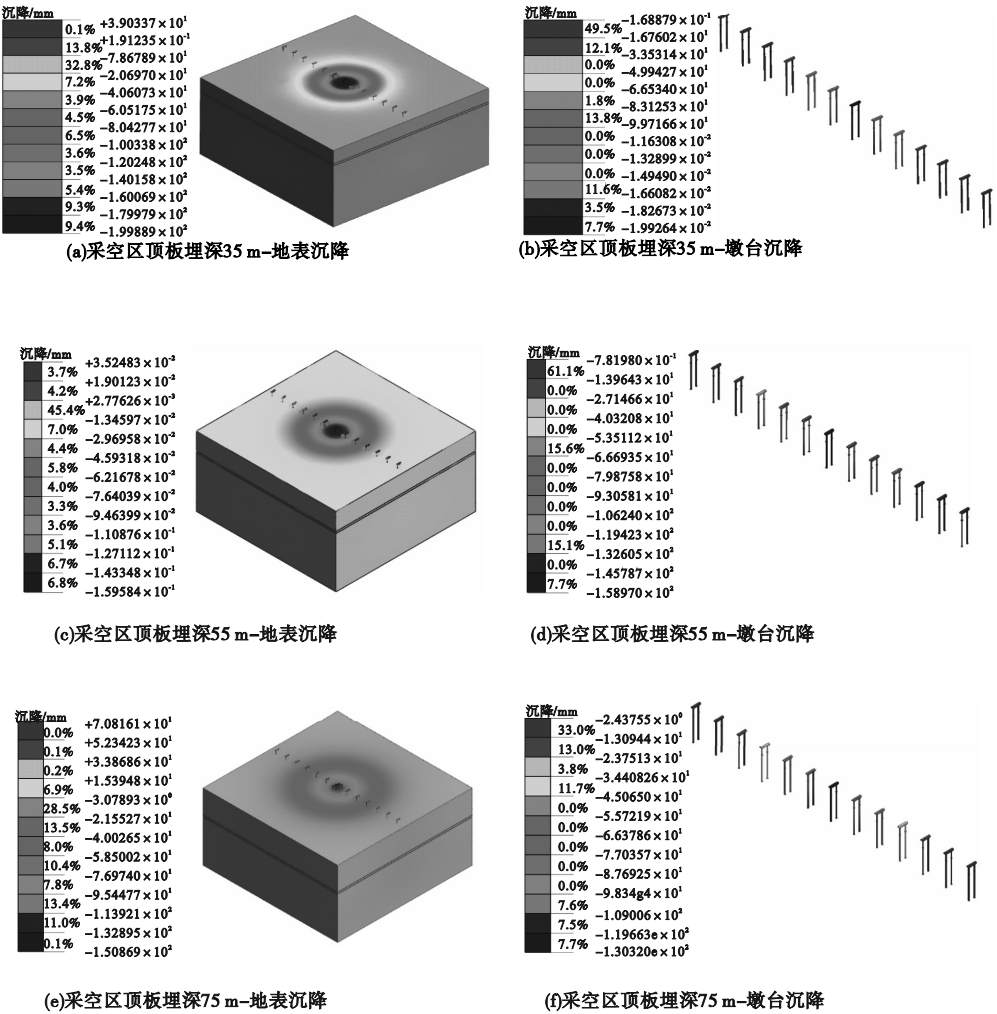


图 6 不同顶板埋深的沉降云图

Fig. 6 The subsidence cloud maps with different roof depths

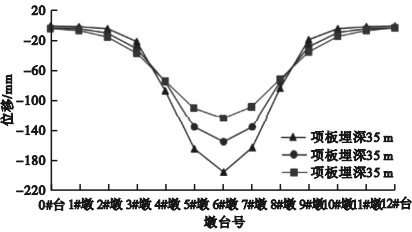


图 7 不同顶板埋深下桥梁地表竖向位移

Fig. 7 Vertical displacement of the bridge surface with different roof depths

由图可知:①改变采空区顶板埋设深度,采空区地表沉降变化明显,地表最大沉降值与顶板埋深呈负相关关系。②顶板埋深35 m、55 m 和 75 m 时,桥梁沿线地表最大沉降分别为192.78 mm、154.92 mm 和125.35 mm。

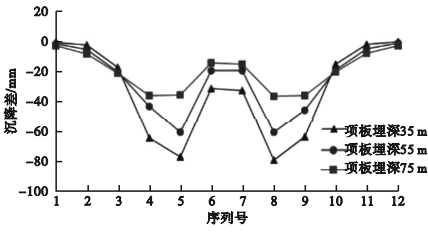


图 8 不同顶板埋深下相邻墩台最大沉降差

Fig. 8 The maximum settlement difference of adjacent piers with different roof burial depths

③顶板埋深 35 m、55 m 和75 m 时,相邻墩台最大沉降差分别为79.01 mm、59.69 mm 和36.63 mm,说明随着采空区顶板埋深的增加,相邻墩台最大沉降差会随之减少,并且在采空区顶板埋深55 m 时满足《公路桥涵地基

与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[20]的规定。在该实际工程中的相同情况下,理论上对于顶板埋深超过55 m的采空区可以考虑不进行处理或者酌情处理。

4.3 采空区空洞高度的影响分析

将采空区半径设置为 80 m,顶板埋深设置在 35 m,分析空洞高度分别为 5 m、3 m 和 1 m 三种情况。各工况沉降计算结果如图 9 所示。

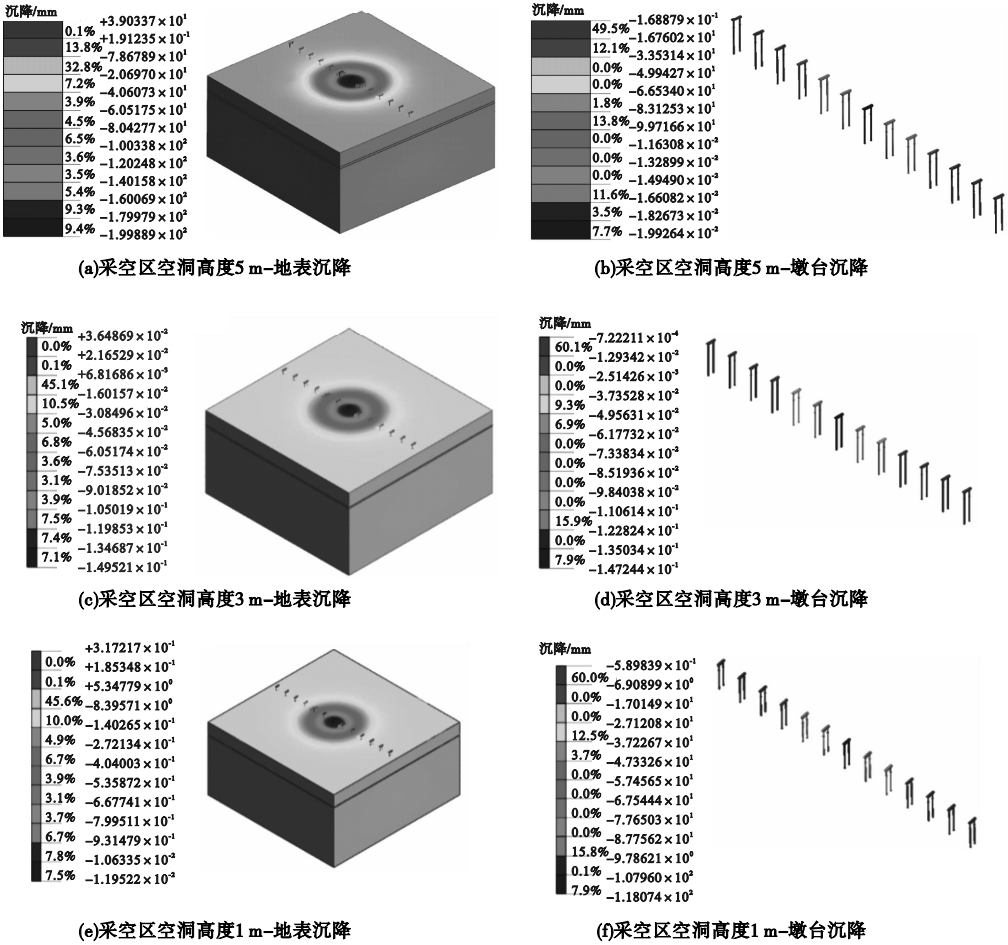


图 9 不同空洞高度的沉降云图

Fig. 9 The sedimentation clouds with different cavity heights

根据计算结果,绘制桥梁纵向地表沉降变化曲线见图 10,桥梁相邻墩台最大沉降差见图 11。

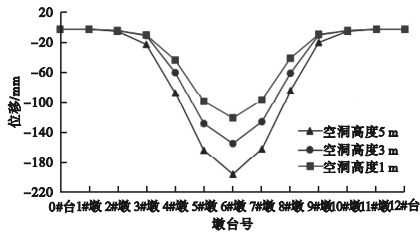


图 10 不同空洞高度下桥梁地表竖向位移

Fig. 10 Vertical displacement of the bridge surface with different void heights

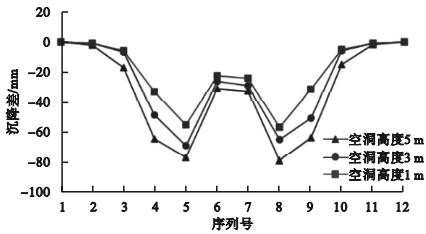


图 11 不同空洞高度下相邻墩台最大沉降差

Fig. 11 The maximum settlement difference of adjacent piers with different cavity heights

由图可知:①改变采空区空洞高度,采空区地表沉降值变化明显,地表最大沉降值与空洞高度呈正相关关系。②空洞高度为

5 m、3 m和1 m时,桥梁沿线地表最大沉降值分别为 192.78 mm、145.99 mm 和 114.06 mm。③采空区空洞高度为 5 m、3 m和1 m时,相邻墩台最大沉降差分别为 79.01 mm、70.24 mm 和 58.78 mm,因此,随着采空区空洞高度的减小,相邻墩台最大沉降差也会随之减少,并且在采空区空洞高度为1 m时满足《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[20]的规定。因此,在该实际工程中的相同情况下,理论上对于采空区空洞高度小于1 m的采空区可以考虑不进行处理或者酌情处理。

4.4 采空区顶板弹性模量的影响分析

将采空区半径设置为 80 m,采空区空洞

高度设置为 5 m,拟定采空区顶板不同弹性模量分别是原始参数、大参数、小参数三种,每种情况顶板物理力学参数见表 3。

表 3 顶板岩层物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of the roof rock formations

弹性模量/ MPa	黏聚力/ kPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	重力密度/ (kN·m ⁻³)
1 000	1 200	0.22	33	18
1 500	1 200	0.22	33	18
2 000	1 200	0.22	33	18

各工况沉降计算结果见图 12 所示。根据计算结果,绘制桥梁纵向地表沉降变化曲线如图 13 所示,桥梁相邻墩台最大沉降差如图 14 所示。

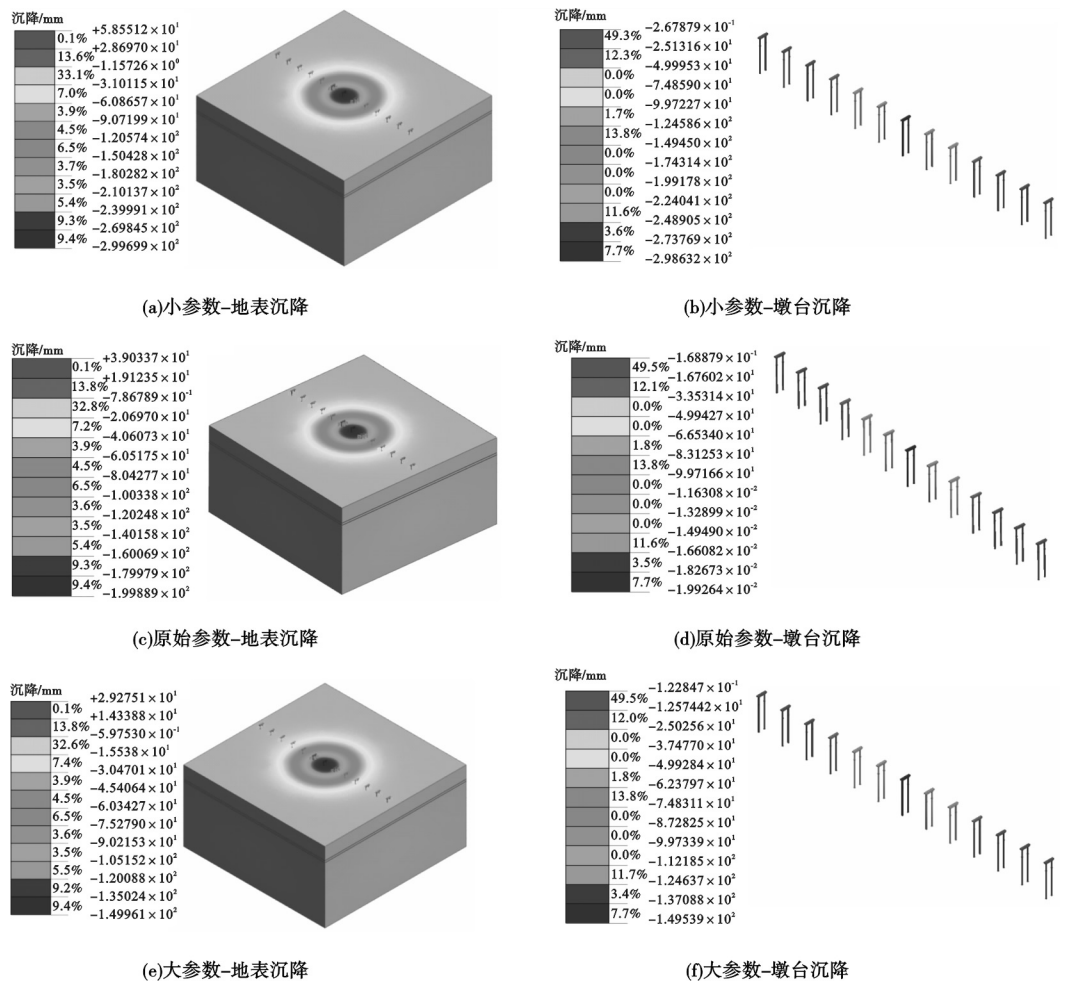


图 12 不同顶板弹性模量的沉降云图

Fig. 12 The sedimentation contours of different roof elastic modulus

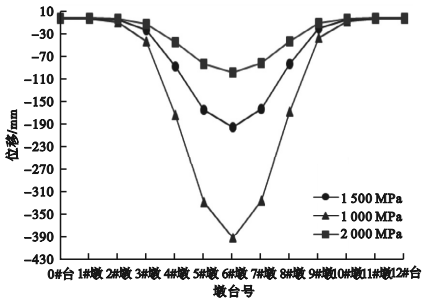


图 13 不同顶板弹性模量下桥梁地表竖向位移

Fig. 13 Vertical displacement of the bridge surface with different roof elastic modulus

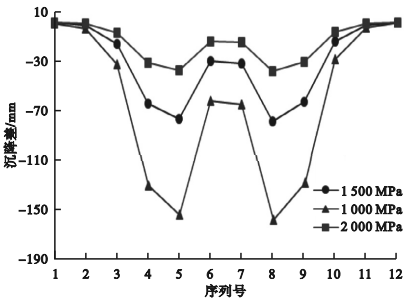


图 14 不同顶板弹性模量下相邻墩台最大沉降差

Fig. 14 The maximum settlement difference of adjacent piers with different roof elastic modulus

由图 12 ~ 图 14 可知:①改变采空区顶板岩层的弹性模量,采空区地表沉降值变化明显,地表最大沉降值与弹性模量大小呈负相关关系。②小参数、原始参数和大参数的采空区地表最大沉降值分别为 289.54 mm、192.78 mm 和 144.48 mm。③小参数、原始参数和大参数的相邻墩台最大沉降差分别为 116.83 mm、79.01 mm 和 58.05 mm,因此,随着采空区顶板岩层弹性模量的增加,相邻墩台最大沉降差也会随之减少,并且在弹性模量为 2 000 MPa 时满足《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)^[20] 的规定。因此,在该实际工程中的相同情况下,对于顶板岩层弹性模量超过 2 000 MPa 的采空区可以考虑不进行处理或者进行简单处理。

5 结 论

(1)地表最大沉降值与采空区半径大小

呈正相关;地表最大沉降值与采空区顶板埋深呈负相关关系;地表最大沉降值与采空区空洞高度呈正相关;地表最大沉降值与采空区顶板岩层弹性模量大小呈负相关关系。

(2)在该工程中,采空区空洞高度设置为 5 m,采空区顶板埋深设置为 35 m,理论上对于半径小于 60 m 的采空区可以不处理;采空区半径设置为 80 m,采空区空洞高度设置为 5 m,理论上对于顶板埋深超过 55 m 的采空区可以不处理;采空区半径设置为 80 m,顶板埋深设置在 35 m,理论上对于采空区空洞高度小于 1 m 的采空区可以不处理;采空区半径设置为 80 m,采空区空洞高度设置为 5 m,对于顶板岩层弹性模量超过 2 000 MPa 的采空区可以不处理。

参考文献

[1] DONNELLY L J. Reactivation of geological faults during mining subsidence from 1859 to 2000 and beyond [J]. Mining technology, 2000,109(3):179-190.

[2] SINGH R P, YADAV R N. Prediction of subsidence due to coal mining in Raniganj coalfield, west Bengal, India [J]. Engineering geology, 1995,39:103-111.

[3] COULTHARD M A. Applications of numerical modeling in underground mining and construction [J]. Geotechnical and geological engineering, 1999,17:373-385.

[4] BELL F G, DE BRUYN I A. Subsidence problems due to abandoned pillar workings in coal seams [J]. Bulletin of engineering geology and the environment, 1999, 57(3): 225-236.

[5] SONIA K A, SINGH K K K, PRAKASH A. Shallow cover over coal mining: a case study of subsidence at Kamptee Colliery, Nagpur, India [J]. Bulletin of engineer geology and the environment, 2007,66(3):311-318.

[6] SAADI A, SHAKHRIAR K, GOSHTASBI K. Profiling function for surface subsidence prediction in mining inclined coal seams [J]. Journal of mining science, 2004,40(2):142-146.

[7] BARYAKH A A, TELEGINA E A, SAMODELKINA N A. Prediction of the intensive surface subsidence in mining potash series [J]. Journal of mining science, 2005,41

- (4):312-319.
- [8] SINGH K B. Pot-hole subsidence in Son-Mahanadi master coal basin [J]. Engineering geology, 2007, 89(1/2):88-97.
- [9] HEJMANOWSKI R, MALINOWSKA A. Evaluation of reliability of subsidence prediction based on spatial statistical analysis [J]. International journal of rock mechanics and mining sciences, 2009, 46(2):432-438.
- [10] 康彦. 采空区地表变形规律及地基稳定性评价[J]. 煤矿开采, 2018, 23(2):65-67.
(KANG Yan. Base stability evaluation and goaf surface deformation law [J]. Coal mining technology, 2018, 23(2):65-67.)
- [11] 贾瀚文, 刘洪磊, 张忠政, 等. 基于现场监测与数值模拟的浅层采空区稳定性分析[J]. 金属矿山, 2020(1):179-185.
(JIA Hanwen, LIU Honglei, ZHANG Zhongzheng, et al. Stability analysis of shallow goaf based on field monitoring and numerical simulation [J]. Metal mining, 2020(1):179-185.)
- [12] 王飞飞, 田春艳, 任青阳, 等. 地下复杂采空区引起地表塌陷渐进发展过程数值模拟研究[J]. 矿冶工程, 2020, 40(6):22-25.
(WANG Feifei, TIAN Chunyan, REN Qingyang et al. Numerical simulation of progressive development process of surface subsidence caused by underground complex goaf [J]. Mining and metallurgical engineering, 2020, 40(6):22-25.)
- [13] 杨喆, 赵金刚. 煤矿采空区地表变形评价中的数值模拟分析[J]. 勘察科学技术, 2021(1):6-10.
(YANG Zhe, ZHAO Jingang. Numerical simulation analysis in evaluation of coal mine goaf surface deformation [J]. Exploration science and technology, 2021(1):6-10.)
- [14] 关军琪, 吕义清, 赵国贞. 黄土沟谷区采空区充填对地表变形规律的影响研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1):49-55.
(GUAN Junqi, LYU Yiqing, ZHAO Guozhen. Study on the influence of goaf filling on surface deformation in loess gully area [J]. Safety in coal mines, 2022, 53(1):49-55.)
- [15] 杨振伟. 煤矿采空区内铁路工程地质选线与路基加固技术研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(3):50-52.
(YANG Zhenwei. Research on railway engineering geological route selection and subgrade reinforcement technology in coal mine goaf [J]. Engineering technology research, 2023, 8(3):50-52.)
- [16] 薛永安, 冀哲, 张文志. 基于残差修正 GM(1, 1)模型的采空区残余变形预测研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(1):101-108.
(XUE Yong'an, JI Zhe, ZHANG Wenzhi. Study on residual deformation prediction of goaf based on residual modified GM(1, 1) model [J]. Safety in coal mines, 2023, 54(1):101-108.)
- [17] 熊威, 孙志杰, 郝晓阳. 基于 SBAS-InSAR 技术的阳城地区采空区地表沉陷分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(2):103-107.
(XIONG Wei, SUN Zhijie, HAO Xiaoyang. Surface subsidence analysis of goaf in Yangcheng area based on SBAS-InSAR technology [J]. Geospatial information, 2023, 21(2):103-107.)
- [18] 陈绍杰, 刘瑞, 徐贞社, 等. 不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉规律[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1):38-48.
(CHEN Shaojie, LIU Rui, XU Zhenshe, et al. Surface subsidence laws of footwall coal seam mining of normal fault under different overburden strata [J]. Journal of Shandong university of science and technology (natural science), 2023, 42(1):38-48.)
- [19] 张兴胜, 谭海成, 干丰源, 等. 高铁线路与采空区在不同夹角下地表沉降研究[J]. 路基工程, 2023(1):222-227.
(ZHANG Xingsheng, TAN Haicheng, GAN Fengyuan, et al. Research on surface subsidence between high-speed railway and goaf at different included angles [J]. Subgrade engineering, 2023(1):222-227.)
- [20] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
(China Communications Highway Planning and Design Institute. Code for design of highway bridge and culvert base and foundation: JTG 3363—2019 [S]. Beijing: China Communications Press, 2019.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)