流砂层与采空区叠跨赋存条件下地表道路工程下沉规律研究*

武泽惠[1],葛永翔[2],张露伟[2],任高峰[2,3],谭星宇[2,4],马凯[2],于燕[5]

(1.武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070;
2.武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
3.关键非金属矿产资源绿色利用教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;
4.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
5.华新水泥股份有限公司, 湖北 武汉 430205)

摘要:为研究流砂层与采空区叠跨赋存条件下地表道路工程下沉规律,以当阳石膏矿采空区上省道S342改扩建工程为背景,采用FLAC3D对流砂层、采空区及二者叠跨赋存条件下的地表位移分布规律进行了研究,评价了流砂层运移与采空区对地表道路段稳定性的影响,并提出空区治理方案。研究结果表明:在流砂层运移与采空区作用下,地表沉降量由空区中心向四周逐渐减小,沉降峰值集中在K5+617~K5+717区间;道路中线中心区域位移沉降较大,自西向东呈先增大后减小的规律,南北两侧沉降较小,道路北线、中线、南线地表最大沉降量分别为69 mm、167 mm、31 mm;流砂层上方覆岩沉降量随着与地表距离的增大,中心区域(K5+630~K5+730区间100 m范围)位移量呈现减小趋势,其他区域位移量呈现增大趋势,因此流砂层空区作用下的地表岩移范围圈定为100 m。研究成果可为流砂层赋存条件下的道路扩建工程提供理论依据。

关键词:流砂层;采空区;道路工程;地表沉降;覆岩移动

中图分类号:TD325 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)05-0095-09

Study on the Subsidence Law of Surface Road Engineering Under the Overlapping Occurrence Conditions of Quicksand Layer and Goaf

WU Zehui[1], *GE Yongxiang*[2], *ZHANG Luwei*[2], *REN Gaofeng*[2,3], *TAN Xingyu*[2,4], *MA Kai*[2], *YU Yan*[5]

(1.School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
2.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
3.Key Laboratory of Green Utilization of Critical Non-metallic Mineral Resources, Ministry of Education, Wuhan, Hubei 430070, China;
4.Changsha Institute of mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
5.Huaxin Cement Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430205, China)

Abstract: In order to study the subsidence law of surface road engineering under the overlapping occurrence conditions of quicksand layer and goaf, taking the reconstruction and expansion project of S342 provincial road above the goaf of Dangyang gypsum mine, FLAC3D was used to study the distribution law of surface displacement under the conditions of quicksand layer, goaf and their overlapping occurrence. The influences of quicksand layer migration and goaf on the stability of surface road sections were evaluated, and a goaf treatment plan was proposed. The research results indicate that under the action of quicksand layer migration and goaf, the surface subsidence gradually decreases from the center of the goaf to the surrounding areas, and the peak subsidence is concentrated in the range of K5+617 to K5+717. The displacement and settlement in the central area of the road centerline are relatively large, showing a pattern of first increasing and then decreasing from west to east. The settlement on the north and south sides is relatively small, with the maximum surface settlement of the north, middle, and south lines of the road being 69 mm, 167 mm, and 31 mm, respectively. As the distance from the surface increases, the displacement of the overlying rock above the quicksand layer shows a decreasing trend in the central area (within

* **收稿日期**:2024-10-19
基金项目:国家自然科学基金项目(52174087)
作者简介:武泽惠(2000—),女,安徽亳州人,硕士研究生,主要研究方向为工程安全与防护。E-mail:wuzehui0122@163.com
通信作者:任高峰(1979—),男,湖北武汉人,博士,教授,主要研究方向为矿床开采理论与技术、智能开采、工程安全与风险管控。E-mail:rgfwhut@163.com

a range of 100 m from K5+630 to K5+730), while the displacement in other areas shows an increasing trend. Therefore, the range of surface rock movement under the action of the goaf at the quicksand layer is defined as 100 m. The research results can provide theoretical basis for road expansion projects under the conditions of quicksand layer occurrence.

Key words: Quicksand layer, Goaf, Road engineering, Surface subsidence, Overlying rock movement

0 引言

闭矿并不意味着矿山灾害的结束,随着时间的推移,矿井开采遗留的潜在灾害,如矿区地层变形、矿区水系变化等仍可能引发灾害事故[1-2]。地下砂层作为一种不良地质地层,在地层变形与水系变化的共同作用下易形成流砂层。流砂层中的细粒物质在地下水或重力作用下持续流失[3-4],会在覆岩内形成离层裂隙、空腔(流砂层空区),极易导致覆盖层土体塌落,形成地表塌陷[5-8]。当阳石膏矿采用空场法开采后遗留大量采空区,其上覆流砂层形成局部空腔并引发显著的地表沉降,对拟改建的省道 S342(当阳市河溶至沙洋段)道路安全造成严重威胁。因此,研究采空区与流沙层复合影响下地表道路工程下沉规律及流砂层上方覆岩移动特征,可为后续道路工程改建提供重要理论依据。

诸多学者对采空区影响下的地表岩层下沉规律开展了大量研究。贺桂成等[9-10]采用 FLAC3D 对石膏矿不同采场的采空区地表沉陷进行了模拟,分析了影响采空区地表沉陷的主要因素,建立了采空区地表沉陷预测的 ANFIS 模型。赵亮等[11]采用数值模拟的方法分析开采对岩体稳定性及地表变形的影响。吴盛才等[12]采用概率积分法预测了采空区影响下的地表移动与变形值,计算了采空区主断面上的变形曲线。陈江军等[13]选用高密度电法、激电中梯法以及地震映射法等综合物探方法对石膏矿采空区进行探测,辅以钻探工作加以验证,分析了三种物探方法在石膏矿采空区探测中的适用性和优缺点,分析结果表明,合理选用物探方法组合可有效提高勘查成果的准确性和可靠性。杨宜军等[14]将微震自动监测技术应用于石膏矿采空区地面塌陷预警,通过分析微震信号,成功发出地面塌陷的预警信息。杨锋等[15]采用现场钻探、理论分析和高密度电法分析了高速公路下覆采空区深部的覆岩破坏与浅层的扰动情况,提出了下伏采空区的治理方案。张晨等[16]基于 Surpac 软件平台,结合石膏矿资料构建了三维可视化模型,直观展示了石膏矿区复杂的地质条件与矿体、采空区以及地面塌陷空间分布特征。刘星辉等[17]对诱发地面塌陷的石膏矿采空区进行稳定性评价,并提出了防治方法。何伟等[18]采用理论分析与数值模拟相结合的方法,得出矿山地下开采诱发的"三带"高度,并计算了地表沉降最大值。针对流砂层各种特性及影响,孟庆彬等[19]采用工程地质钻探与地面直流电法勘探技术,确定了流砂层的厚度与含水特征。刘平等[20]通过数值模拟对比分析,得到了流砂层对围岩变形破坏机制的影响规律。刘聪聪等[21]采用 GCTS 双向动三轴仪探究了郑州市深埋流砂层的动力特性,研究结果表明,深埋流砂层的动力变形过程可以分为弹性阶段、塑性变形阶段和塑性变形的发展阶段。

综上可知,现阶段关于流砂层影响上覆岩层运移及地表道路工程下沉规律的研究明显不足,特别是对于流砂层与采空区叠跨赋存条件下的地表道路工程下沉规律研究较少。因此,本文以当阳石膏矿为研究背景,采用微动探测技术确定了流砂层及采空区的空间分布,通过 FLAC3D 数值模拟软件分析了省道 S342(当阳市河溶至沙洋段)道路的稳定性。研究揭示了流砂层上方不同深度覆岩的位移变化特征,探究了流砂层与采空区叠跨赋存条件下的地表道路工程下沉规律。研究成果可为省道 S342 扩建工程规划线路提供理论依据,且丰富了流砂层这种特殊地质条件下的地表移动变形规律研究。

1 工程背景

1.1 道路概况

当阳市河溶至沙洋段现有道路 S342 为四级公路,根据规划,该路段拟升级改造为二级公路,路线全长 7.633 km。其中,河溶至沙洋段 K5+517~K5+790 区间穿过当阳石膏矿采空区。

近年来,当阳石膏矿采空区地质灾害频发,2017 年 7 月,井口以北 420 m 处发生地面塌陷;2023 年 6 月,井口东侧约 200 m 及东偏北方向约 250 m 处居民房屋出现不同程度开裂;2023 年 11 月,采空区周边部分居民房屋、道路出现不同程度开裂变形,影响 S342 道路通行。

经探查,河溶至沙洋段道路 K5+517~K5+

790 区间经过采空区上方，且地下 60 m 处存在空腔，结合当地水文地质环境，认为是由于流砂层受地下水的作用，细粒物质通过覆岩内裂隙流出形成的空腔，进而引起溶蚀塌陷。

流砂层与采空区地层主要为古近系夹马槽组(E_2j^4)，该组地层具有明显的 6 段沉积韵律特征。流砂层分布在第 5 段(E_2j^{4c})，主要以紫色含膏细粒砂岩与夹薄层粉砂质泥岩为主，结构类型为碎屑岩-石膏岩，平均厚度为 48 m。采空区分布在第三段(E_2j^{4c})，主要由灰色石膏岩、紫色含膏砂岩夹云质泥岩和薄层石膏岩组成，结构类型为碎屑岩夹泥岩-石膏岩，平均厚度为 30 m。

当阳石膏矿于 2018 年关闭，采用房柱法开采，矿体埋深为 116.31 m，矿体倾角为 4°，矿层厚度沿走向和倾向变化不大。矿体最大厚度为 8.83 m，平均厚度为 3.03 m；矿房间距为 6～8 m，矿房尺寸可见 6 m×6 m、4 m×8 m 不等；矿柱直径为 1.3～1.8 m，采空区高度为 2.50 m。矿区及周边水系发育，水库众多，形态复杂，矿层与围岩由软弱—半坚硬的岩类组成，岩石强度低，稳定性差。

1.2　流砂层空区探测

利用微动探测仪确定流砂层空区分布特征，探测点分布如图 1 所示。在 S342 道路东西方向上布置微动勘探测点 108 个，其中复测测点 9 个。连成测线后，东西方向测线共 9 条，南北方向测线共 11 条，形成尺寸为 200 m×250 m 的探测网络。采用 10 m 直径台阵进行数据采集，采集时长为 20 min，采样频率为 500 Hz。为验证探测结果，布置了 5 个钻孔进行钻探验证，ZK1 和 ZK5 钻孔布置于道路 K5＋517～K5＋617 区间，ZK3 钻孔布置在道路 K5＋717～K5＋790 段，ZK2、ZK4 钻孔布置于道路 K5＋617～K5＋717 区间，位于道路两侧。

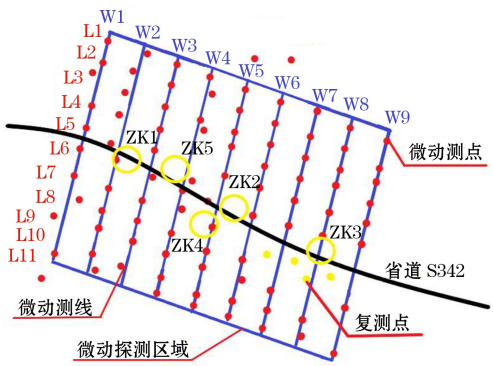
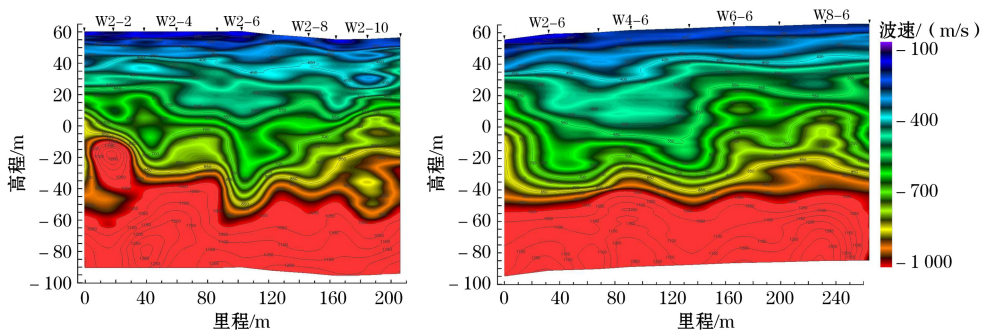


图 1　探测点分布

Fig.1　Distribution of detection points

L6 测线位于 S342 道路上，测线方向与道路平行；W2 测线与 L6 号测线垂直(即垂直于道路布置)，绘制 W2 测线与 L6 测线剖面面波相速度等值线图，发现测点 W2-1 与 W2-2 中间区域、测点 W2-6 附近以及测点 W5-6 与 W6-6 中间区域附近出现异常，如图 2 所示。



(a) W2 测线剖面　　(b) L6 测线剖面

图 2　微动探测剖面面波相速度等值线图

Fig.2　Velocity contour maps of profile wave phase in micro motion detection

根据资料显示，测点 W2-6 附近高程 15～17 m 与－36～－46 m 处有流砂层空洞，微动反演结果证实该处的横向波速呈现漏斗状；测点 W2-1、W2-2、W2-10 下方存在深度对应较好的低速异常区域，推测其为采空区破坏带所在位置；测点 W5-6 与 W6-6 中间区域高程 21～22 m 处有流砂层空洞，微动反演结果显示该处的横向波速呈现条带状；测点 W5-6 附近高程 27～29 m 处有流砂层空洞，微动反演结果显示该处的横向波速呈现条带状，推测其为溶蚀塌陷形成的流砂层空洞。通过微动探测技术获得了波速异常特征，为后续流砂层建模提供了依据。

基于微动探测结果确定出地下流砂层空区形态，流砂层整体存在于采空区正上方 56 m 至道路底下 60 m 区间，其中道路北侧分布范围较南侧更

广。流砂层区域呈现圈椅状,南北长约 140 m,东西宽约 120 m,平均高度为 0.6 m。当阳石膏矿流砂层空区形态及分布位置如图 3 所示。

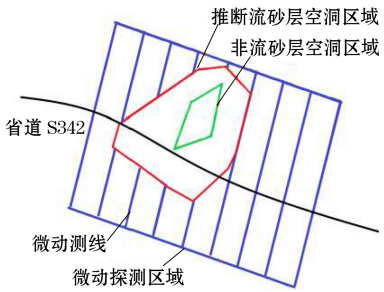


图 3 流砂层空区形态

Fig.3 The morphology of empty area of quicksand layer

2 数值模拟

2.1 数值模型建立

采用 FLAC3D 数值模拟软件构建模型,并对采场开挖部分进行网格加密处理。建立的数值模型尺寸为 500 m×500 m×140 m(长×宽×高),模型由上至下分别为粉砂质泥岩层、流砂层、粉砂质泥岩层、石膏矿层和粉砂质泥岩层。模型共有 349 575 个网格单元,278 768 个节点,具体模型如图 4 所示。

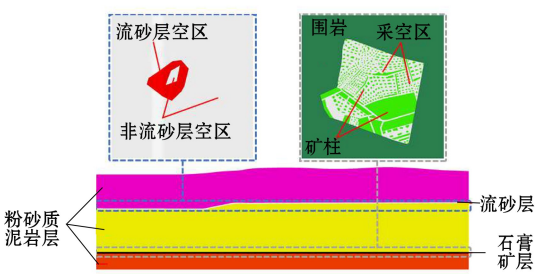


图 4 数值模拟模型

Fig.4 Numerical simulation model

2.2 岩体物理力学参数

结合地质勘探数据,对研究区域地质情况进行单一化处理,根据室内岩石力学试验及土工试验,考虑实际地质情况,得到岩体力学性质参数,见表 1。

表 1 岩体力学性质参数

Table 1 Mechanical properties parameters of rock mass

组别	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	密度/(kg/m³)	泊松比 μ	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂质泥岩	1.51	14.14	2.20	2 400	0.33	2.00	31.45
石膏矿层	0.93	13.43	2.10	2 340	0.44	1.10	34.50
粉砂质泥岩	1.19	20.22	2.50	2 430	0.26	1.41	35.10

2.3 模拟方案及监测线

石膏矿层开采以后,采场上覆岩层会受到较大扰动影响,而流砂层空区的形成会对围岩产生二次扰动。为研究石膏矿采动和流砂层运移对上覆岩层的影响,以采空区、流砂层及二者共同作用下的覆岩移动规律为切入点,设计了 3 种条件下的数值模拟方案。

方案 1:仅对流砂层进行开挖,探究流砂层运移形成的空洞对地表道路工程下沉规律的影响。

方案 2:仅对矿体进行开挖,探究矿体开采形成的采空区对地表道路工程下沉规律的影响。

方案 3:先对矿体进行一次开挖,待应力平衡后,再开挖流砂层空洞,探究石膏矿采动和流砂层运移二者复合作用对地表道路工程下沉规律的影响。

此次石膏矿采空区模拟范围主要为 S342(当阳市河溶至沙洋段)道路改扩建工程石膏矿采空区段,K5+517～K5+790 区间。从道路中线往南北各 100 m 的边界分别称为南线和北线,如图 5 所示。沿道路走向布置北线、中线及南线三条监测线,通过分析各监测线的沉降变形情况,探究地下采空区对不同地区地表沉降的影响。

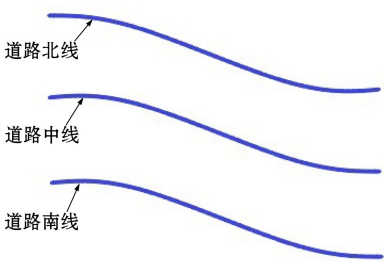


图 5 监测线位置示意

Fig.5 Schematic of monitoring line location

3 模拟结果分析

3.1 覆岩移动模拟结果

3.1.1 方案 1 计算结果

由图 6 可知,流砂层开挖后,地表最大沉降位置在道路中线流砂层中心,流砂层空区顶板沉降量为 210 mm,地表沉降量为 144 mm。随着与流砂层中心位置距离的增加,地表沉降量逐渐降低。北线顶板沉降量为 50 mm,地表沉降量为 40 mm,南线距离流砂层位置更远,几乎不受流砂层空区影响。

由图 7 可知,流砂层运移引起的地表沉降量呈正态分布,地表沉降量自西向东先增大后减小,南北两侧沉降量小,中部沉降量大,在 K5+567～K5+767 区间,中线沉降量超过 40 mm。

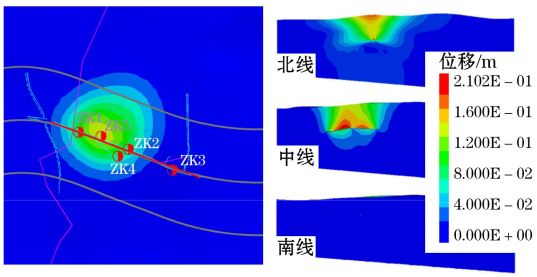


图 6　流砂层运移作用下覆岩位移云图

Fig.6　Cloud map of overlying strata displacement under the action of quicksand layer migration

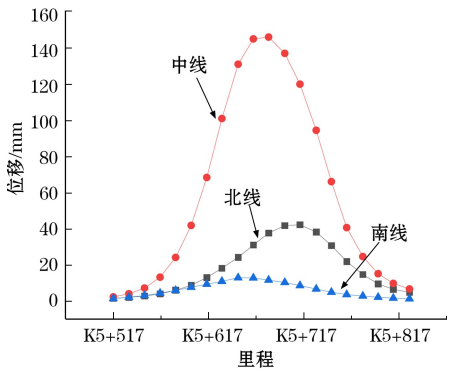


图 7　流砂层运移作用下地表沉降曲线

Fig.7　Curves of surface subsidence under the action of quicksand layer migration

3.1.2　方案 2 计算结果

由图 8 可知，采空区作用下地表最大沉降位置在道路北线，采空区顶板沉降量为 47 mm，地表沉降量为 29 mm。南线西侧、中线东侧及北线中间位置采空区顶板沉降较大，中线采空区顶板沉降量为 54 mm，地表沉降量为 25 mm，南线采空区顶板沉降量为 68 mm，地表沉降量为 22 mm。

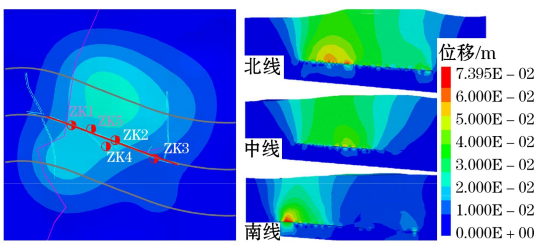


图 8　采空区作用下覆岩位移云图

Fig.8　Cloud map of overlying strata displacement under the action of goaf

由图 9 可知，采空区引起的地表沉降值呈正态分布，地表沉降量自西向东先增大后减小，道路中线与南线沉降值较小，北线沉降值最大，沉降量峰值集中在 K5＋617～K5＋717 区间。

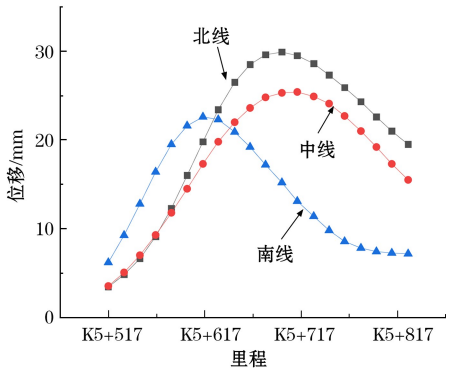


图 9　采空区作用下地表沉降曲线

Fig.9　Curves of surface subsidence under the action of goaf

3.1.3　方案 3 计算结果

由图 10 可知，在流砂层运移与采空区共同作用下，地表最大沉降位置在道路中线流砂层中心，地表沉降量为 167 mm。随着与流砂层中心位置距离的增加，地表沉降量逐渐降低，北线地表沉降量为 69 mm，南线地表沉降量为 31 mm。

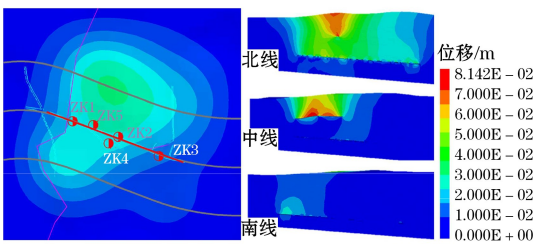


图 10　流砂层运移与采空区综合作用下覆岩位移云图

Fig.10　Cloud map of overlying strata displacement under the action of quicksand layer migration and goaf

由图 11 可知，流砂层空区与采空区共同引起的地表沉降量呈正态分布，地表位移自西向东先增大后减小，南北两侧沉降量小，中部沉降量大，沉降峰值集中在 K5＋617～K5＋717 区间。

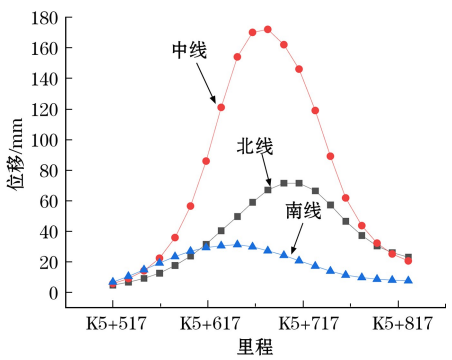


图 11　流砂层运移与采空区综合作用下地表沉降曲线

Fig.11　Curves of surface subsidence under the action of quicksand layer migration and goaf

3.2 地表位移沉降结果对比分析

根据不同方案数值模拟的结果,对地表位移沉降量、沉降范围和沉降规律展开分析。

由图 12 可知,流砂层运移与采空区共同作用下,道路北线地表沉降量较大,最大沉降量为 69 mm,流砂层运移作用下的北线地表最大沉降量为 40 mm,采空区作用下的北线地表最大沉降量为 29 mm,沉降峰值均集中在 K5+717 附近。

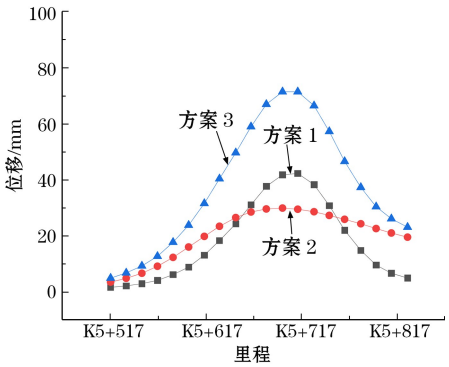


图 12 道路北线地表沉降曲线

Fig.12 Curves of surface subsidence of the northern route of the road

由图 13 可知,流砂层运移与采空区共同作用下,道路中线地表沉降量较大,最大沉降量为 167 mm,流砂层作用下的道路中线地表最大沉降量为 144 mm,采空区作用下的中线地表最大沉降量为 25 mm,沉降峰值均集中在 K5+617～K5+717 区间。

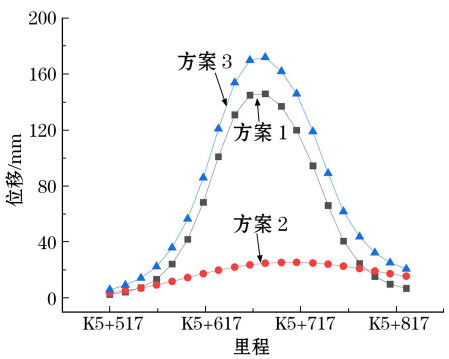


图 13 道路中线地表沉降曲线

Fig.13 Curves of surface subsidence of the middle route of the road

由图 14 可知,流砂层运移与采空区共同作用下道路南线地表沉降量较大,最大沉降量为 31 mm,流砂层作用下的南线地表基本无扰动,采空区作用下的南线地表最大沉降量为 22 mm,沉降峰值均集中在 K5+617 附近。

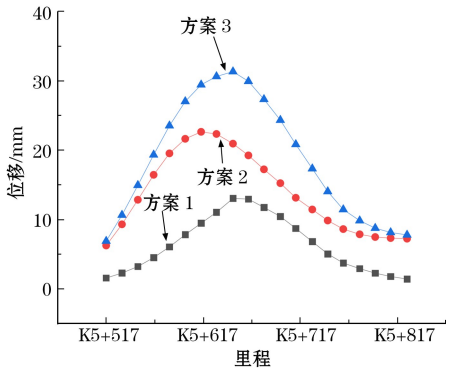


图 14 道路南线地表沉降曲线

Fig.14 Curves of surface subsidence of the southern route of the road

根据以上分析可知,流砂层运移与采空区共同作用下的地表沉降量最大,沉降量为流砂层运移与采空区单独作用下的地表沉降量相加。在二者共同作用下,流砂层运移对地表沉降造成的影响比采空区大。

方案 1 模拟结果表明,在流砂层运移作用下,地表沉降量自西向东呈先增大后减小的趋势,南北两侧沉降量小,中部沉降量大;方案 2 模拟结果表明,在采空区作用下,地表沉降量自西向东同样呈先增大后减小的趋势;方案 3 模拟结果表明,在流砂层运移与采空区共同作用下,流砂层空区引起的地表沉降相对于采空区更为严重。

3.3 不同深度覆岩位移变化规律

由上述分析可知,流砂层空区对地表下沉值影响较大,为研究流砂层空区对不同深度覆岩移动变化,在流砂层空区上覆岩层不同深度布置探测线,间距为 20 m,分析流砂层运移作用下不同深度覆岩位移的变化规律。

由图 15 可知,北线覆岩最大位移位置在距离地表 40 m 处,位移量为 55 mm。覆岩位移量自西向东先增大后减小,覆岩变化曲线峰值位于北线东侧。

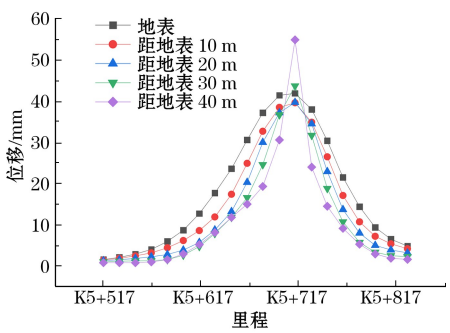


图 15 道路北线覆岩位移曲线

Fig.15 Displacement curves of overlying strata of the northern route of the road

由图 16 可知，流砂层空区上方道路中线不同深度覆岩位置量整体呈现倒“U”形曲线分布规律。道路中线覆岩最大位移位置在地表处，最大位移量为 200 mm，并向东西两侧逐渐减小。K5＋630～K5＋730 区间(100 m 范围)位移量大于等于 100 mm，将该区间标记为重点地表沉降关注区域。随着与地表距离的增大，流砂层上方覆岩沉降量在该区域位移量呈减小趋势，其他区域位移量呈增大趋势，因此将流砂层空区作用下地表岩移范围圈定为 100 m。

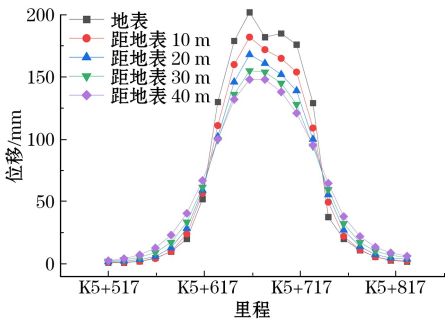


图 16　道路中线覆岩位移曲线

Fig.16　Displacement curves of overlying strata of the middle route of the road

由图 17 所知，道路南线覆岩最大位移位置在地表处，位移量为 13.2 mm。覆岩位移量自西向东先增大后减小，覆岩变化曲线峰值位于南线中间。流砂层上方南线不同深度覆岩移动变化整体呈现倒“V”形曲线分布规律。

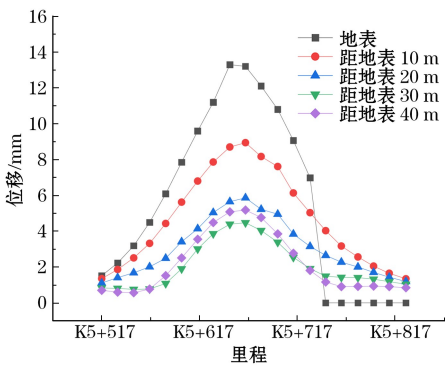


图 17　道路南线覆岩位移曲线

Fig.17　Displacement curves of overlying strata of the southern route of the road

4　空区治理方案

流砂层空区与采空区对道路的主要危害为空区后期塌陷及覆岩不均匀变形，导致既有道路变形产生裂缝。治理方案以地下治理为主，地表治理为辅，并对地表和道路变形进行实时监测。

4.1　地下空区治理

针对采空区埋深较大、停采时间长以及流砂层空区不规则等问题，采用灌注填充法进行空区治理。通过向采空塌陷区灌注充填材料，充填、胶结采空区空洞及松散体，改善地层物理力学性质。在空区治理范围内，沿外围边缘布置多排梅花型帷幕孔，孔距为 9 m；灌注钻孔采用梅花型布置，钻孔排距、孔间距均为 15 m。按照“先中间，后周边”的施工顺序，先施工中间部位注浆孔，后施工帷幕孔。结合采空区治理工程需要，灌注时采用水泥、黏土等材料，并加入适量的水玻璃、三乙醇胺等添加剂改变浆液性能，缩短凝结时间。浆液的浓度采用由稀到浓的梯度控制，水固质量比取 1∶1～1∶1.3；水灰比取 3∶7、2.5∶7.5、2∶8。

4.2　地表道路维护

在对地下空区进行注浆处理后，针对受空区影响而产生变形破坏后的道路，采取建筑措施、结构措施和地基处理措施抵抗道路变形，降低采空区残余沉降对道路的影响。具体而言，对采空区影响范围内产生大面积地面塌陷破坏的道路，采用道路重新修筑、路基回填压实、地基挖除换填等措施；对出现小面积路面沉降裂缝、块状裂缝、龟裂、坑槽等问题的现象，结合地基处理进行局部填补维修。

4.3　变形监测

为判断塌陷区的稳定状态，在空区治理范围内进行地表和道路变形监测。根据监测阶段分为施工期间监测、防治效果监测和长期动态监测。

施工期间监测可判断塌陷区稳定状态，了解工程扰动等因素对塌陷区的影响，监测周期为每半个月 1 次；防治效果监测可了解工程实施后塌陷区的变化特征，为评价防治工程效果及工程竣工验收提供科学依据，监测周期为 1 a；长期动态监测结合道路现状及后续规划，对道路及周边进行长期动态跟踪，了解塌陷区的稳定性变化特征。

变形监测的主要内容包括地表的水平位移、垂直位移、地表裂缝及建(构)筑物沉降、倾斜等[22]，监测方法应符合表 2 的规定。

表 2　塌陷区监测内容及方法

Table 2　Monitoring contents and methods for subsidence areas

监测内容	监测方法
水平位移	三角网、极坐标法、交会法、GNSS 测量、激光准直法等
垂直位移	水准测量、三角高程测量等
裂缝监测	精密测距、伸缩仪、测缝计、位移计等
建(构)筑物监测	经纬仪投点法、差异沉降法、激光准直法等

5 结论

为研究流砂层运移和采空区综合影响下覆岩移动规律,本文采用 FLAC3D 数值模拟软件对流砂层运移、采空区及二者叠跨赋存条件下的地表位移分布规律进行了研究,主要得出以下结论。

(1) 流砂层空区作用下,上覆岩层形成漏斗形沉降区域,地表最大沉降量为 144 mm,沉降量自空区中心向四周逐渐减小;采空区作用下,上覆岩层地表最大沉降位置在道路北线中心,最大沉降量为 29 mm;流砂层运移与采空区共同作用下,地表最大沉降量为 167 mm,且地表沉降受流砂层影响较大。

(2) 流砂层运移作用下,不同深度覆岩最大位移位置在道路中线地表处,最大位移量为 200 mm,并向东西两侧逐渐减小。流砂层上方覆岩沉降量随着与地表距离的增大,中心区域(K5+630~K5+730 区间 100 m 范围)位移量呈现减小趋势,其他区域位移量呈现增大趋势,因此流砂层空区作用下的地表岩移范围圈定为 100 m。

(3) 采空区治理方案采用"地下治理为主,地表治理为辅"的综合治理方案。采用灌注填充法进行空区治理,通过向空区灌注充填材料,充填、胶结采空区空洞及松散体,改善地层物理力学性质;对影响区内产生大面积破坏的道路,采用道路重新修筑、路基回填压实、地基挖除换填等措施;对地表沉降裂缝、塌陷坑槽等结合地基处理进行局部填补维修;在空区治理范围内进行地表和道路变形监测。

参考文献(References):

[1] 冯东梅.闭矿后矿区环境地质灾害分析[J].辽宁工程技术大学学报,2002,21(4):526-527.
FENG Dongmei. Analyses of environ geological disasters of closed coal mines [J]. Journal of Liaoning Technical University,2002,21(4):526-527.

[2] 关卓.大连开发区石棉矿塌陷地质灾害评估与治理[D].大连:大连理工大学,2006.
GUAN Zhuo. Evaluation and treatment of sinkholes geological hazards for asbestos mine of dalian e&t development zone[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2006.

[3] 高晓耕.斜井上部流砂层塌陷空洞纳米瞬变电磁法探测[J].中国煤炭,2016,42(8):25-29.
GAO Xiaogeng. Research on detecting collapse holes in quicksand layer above inclined shaft by NanoTEM[J]. China Coal,2016,42(8):25-29.

[4] 关众.上覆含水流砂层下安全采煤技术[J].煤矿安全,2012,43(3):38-40.
GUAN Zhong. Safe coal mining technology under overlying water-bearing quicksand stratum[J]. Safety in Coal Mines, 2012,43(3):38-40.

[5] REN Fengyu, ZHANG Jing, OUYANG Zhihua, et al. Calculation of elastic modulus for fractured rock mass using dimensional analysis coupled with numerical simulation[J]. Mathematical Problems in Engineering,2021:2803837.

[6] ZHAO Yong, YANG Tianhong, BOHNHOF Marco, et al. Study of the rock mass failure process and mechanisms during the transformation from open-pit to underground mining based on micro seismic monitoring [J]. Rock Mechanics and Rock engineering,2018,51(5):1473-1493.

[7] 李益陈,饶凌志,蔺力.雷溪石膏矿地面沉陷特征及沉陷机理[J].中国非金属矿工业导刊,2015(6):48-52.
LI Yichen, RAO Lingzhi, LIN Li. Ground subsidence features and settlement mechanism of Leixi Gypsum Mine [J]. China Non-metallic Minerals Industry,2015(6):48-52.

[8] 夏开宗,陈从新,夏天游,等.结构面对程潮铁矿西区地表变形的影响分析[J].岩土力学,2015,36(5):1389-1396+1406.
XIA Kaizong, CHEN Congxin, XIA Tianyou, et al. Analysis of influence of structural planes on surface deformation in western area of Chengchao Iron Mine[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(5):1389-1396+1406.

[9] 贺桂成,丁德馨,刘永,等.衡山石膏矿老采空区地表沉陷的ANFIS预测[J].采矿与安全工程学报,2012,29(6):876-881.
HE Guicheng, DING Dexin, LIU Yong, et al. ANFIS prediction of the surface subsidence of the old goaf of the gypsum mine in Hengshan[J]. Journal of Mining & Safety Engineering,2012,29(6):876-881.

[10] 贺桂成,刘永,张志军,等.衡山石膏矿地面塌陷机理的FLAC3D模拟[J].矿业研究与开发,2013,33(1):73-76+109.
HE Guicheng, LIU Yong, ZHANG Zhijun, et al. FLAC3D simulation of mechanism of surface subsidence in a gypsum mine, Hengshan[J]. Mining Research and Development, 2013,33(1):73-76+109.

[11] 赵亮,文兴,覃敏,等.某石膏矿床深部开采稳定性分析[J].矿业研究与开发,2022,42(5):54-59.
ZHAO Liang, WEN Xing, QIN Min, et al. Stability analysis on deep mining in a gypsum deposit[J]. Mining Research and Development,2022,42(5):54-59.

[12] 吴盛才,徐鹏,贺跃光.高速公路下伏采空区地表变形预计及稳定性评价[J].测绘科学,2012,37(2):97-99.
WU Shengcai, XU Peng, HE Yueguang. Surface deformation prediction and stability assessment of highway underlying mined-out area[J]. Science of Surveying and Mapping,2012,37(2):97-99.

[13] 陈江军,刘波,王鹏来,等.综合物探方法在石膏矿采空区探测中的应用研究[J].地球物理学进展,2018,33(2):783-789.
CHEN Jiangjun, LIU Bo, WANG Penglai, et al. Application research of integrated geophysical exploration techniques to gypsum mine gob[J]. Progress in Geophysics, 2018,33(2):783-789.

[14] 杨宜军,李业,梁巍,等.微震自动监测技术在荆门市A石膏矿采空区地面塌陷预警中的应用[J].安全与环境工程,2023,30(3):190-196.
YANG Yijun, LI Ye, LIANG Wei, et al. Application of microseismic automatic monitoring technology in the early warning of ground collapse in A gypsum mining goaf of Jingmen City[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023,30(3):190-196.

[15] 杨锋,郭庆彪,万战胜,等.渑栾高速采空区路段覆岩赋存状态与处治对策[J].科学技术与工程,2021,21(9):3537-3543.
YANG Feng, GUO Qingbiao, WAN Zhansheng, et al. Overburden conditions and treament measures of the Mine-Luan expressway goaf secton[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(9):3537-3543.

[16] 张晨,苏昌,徐光黎,等.应城市金龙石膏矿区三维地质可视化模型的建立与应用[J].安全与环境工程,2024,31(5):146-152.
ZHANG Chen, SU Chang, XU Guangli, et al. Establishment and application of 3D geological visualization model for Yingcheng Jinlong gypsum mining area[J]. Safety and Environmental Engineering,2024,31(5):146-152.

[17] 刘星辉,苏国友.邵东县石膏矿采空区地面稳定性评价及地质灾害防治对策[J].矿冶工程,2004(2):20-23.
LIU Xinghui, SU Guoyou. Mined-out area of Shaodong gypsum mine:its ground stability evaluation and geological disaster's prerention and cure measures[J]. Mining and Metallurgy Engineering,2004(2):20-23.

[18] 何伟,王星,李同鹏.某石膏矿地下开采诱发的地表沉降分析[J].金属矿山,2021(6):210-215.
HE Wei, WANG Xing, LI Tongpeng. Analysis of surface subsidence induced by underground mining in a gypsum mine[J]. Metal Mine,2021(6):210-215.

[19] 孟庆彬,韩立军,石荣剑,等.煤矿斜井井筒过流砂层施工技术研究及应用[J].岩土工程学报,2015,37(5):900-910.
MENG Qingbin, HAN Lijun, SHI Rongjian, et al. Study and application of construction technology for inclined shafs penetrating drift sand strata in coal mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2015,37(5):900-910.

[20] 刘平,刘池,王洪涛,等.富水砂层影响下隧道围岩变形破坏机制的数值模拟研究[J].现代隧道技术,2020,57(4):74-81.
LIU Ping, LIU Chi, WANG Hongtao, et al. Numerical simulation study on the deformation and failure mechanism of tunnel surrounding rock under the effect of water-rich sand layer[J]. Modern Tunnelling Technology,2020,57(4):74-81.

[21] 刘聪聪,张永超,张润华,等.郑州市深埋流砂层动力特性试验研究[J].建筑结构,2021,51(增刊1):1899-1904.
LIU Congcong, ZHANG Yongchao, ZHANG Runhua, et al. Experimental study on dynamic characteristics of deep buried quicksand layer in Zhengzhou[J]. Building Structure, 2021,51(Suppl.1):1899-1904.

[22] 郭松.短壁采空塌陷场地高架道路建设适宜性评价方法与应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
GUO Song. Method of viaduct expressway construction suitability evaluation in short wall goaf collapse area and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2021.