

城市地面塌陷数值模拟研究

姜兴基^{1,2}, 朱凯飞^{1,2}, 陈 帅^{1,2}

¹华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

²河南省岩土力学与结构工程重点实验室, 河南 郑州

收稿日期: 2024年11月18日; 录用日期: 2024年12月14日; 发布日期: 2024年12月20日

摘要

随着城市化进程的加快, 城市地面塌陷问题日益严重, 对人民生命财产安全构成威胁。本研究旨在通过数值模拟方法, 探究城市地面塌陷的机理及其影响因素, 以期为地面塌陷的预防和治理提供科学依据。文章通过数值模拟, 对局部、整体湿陷性黄土的不同厚度、汽车等附加荷载、黄土层顶部有杂填土层和路基的不同情况进行研究。数值模拟结果表明: 在湿陷性黄土地区, 当上覆土层为湿陷性黄土层时, 无论是局部浸润饱和还是整体浸润饱和, 黄土的湿陷沉降均随着黄土厚度的增大而增大; 当在湿陷性黄土层上部路面施加交通荷载时, 湿陷仍表现为荷载中心沉降大, 两侧沉降小。若湿陷性黄土层上覆杂填土层时, 浸水饱和后由于不同地层沉降量的差异可能会形成地下空洞, 当空洞逐渐积累到一定程度时, 可能会导致上覆土体局部突然下沉, 产生地面塌陷。

关键词

地面塌陷, 土体厚度, 荷载, 数值模拟

Numerical Simulation Study of Urban Ground Collapse

Xingji Jiang^{1,2}, Kaifei Zhu^{1,2}, Shuai Chen^{1,2}

¹College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Henan Province Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Structural Engineering, Zhengzhou Henan

Received: Nov. 18th, 2024; accepted: Dec. 14th, 2024; published: Dec. 20th, 2024

Abstract

With the acceleration of the urbanization process, the problem of urban ground collapse is becoming more and more serious, which poses a threat to people's lives and property safety. This study

文章引用: 姜兴基, 朱凯飞, 陈帅. 城市地面塌陷数值模拟研究[J]. 土木工程, 2024, 13(12): 2264-2271.

DOI: 10.12677/hjce.2024.1312249

aims to explore the mechanism and influencing factors of urban ground collapse through numerical simulation in order to provide a scientific basis for the prevention and treatment of ground collapse. In this paper, the different thicknesses of local and integral collapsible loess, additional loads such as automobiles, and the different conditions of mixed fill and subgrade on top of the loess layer are studied by numerical simulation. The numerical simulation results show that in a collapsible loess area, when the overlying soil is collapsible loess, the collapsible settlement of loess increases with the increase of loess thickness, no matter if it is saturated locally or saturated as a whole. When the traffic load is applied to the upper pavement of the collapsible loess layer, the collapsibility still shows that the center settlement of the load is large, and the settlement on both sides is small. If the collapsible loess layer is covered with a mixed fill soil layer, the underground cavity may be formed after being saturated by water due to the difference in the settlement amount of different strata. When the cavity gradually accumulates to a certain extent, the local subsidence of overlying soil may be suddenly caused, resulting in ground collapse.

Keywords

Ground Collapse, Soil Thickness, Load, Numerical Simulation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,由于人口增长过快,随着社会经济的快速增长和人民生活水平的提高,城市建设迅速发展,城市道路不断新建、扩建、改建,城市道路塌陷事件频频发生,加上城市地面塌陷突发性和隐蔽性的特点,严重威胁到行车、行人安全,影响到城市运营安全、人们正常生活以及城市的社会形象,引起强烈的负面社会效应[1]-[3]。因此,了解地面塌陷的成因、机理以及制定有效的预防和应对策略,对于保障人民的生命财产安全和维护社会稳定至关重要。

目前,国内外许多专家学者采用不同的方法对城市地面塌陷进行了大量研究,并取得了丰硕的研究成果。1) 理论研究方面:钟世英等人[4]汇总并分析了2014至2015年间66起城市路面塌陷案例。研究发现水、施工活动、交通负荷和地下空洞是城市路面塌陷的主要成因。张峰[5]以近年全国道路塌陷事故为研究对象,采用ANFIS法探讨如何提前通过观察来预测道路塌陷风险。2) 试验研究方面:余乐[6]利用平面应变模型试验技术,对地层中不同形状的土洞稳定性进行了深入研究。通过观察并记录地层失稳和破坏的全过程,对不同形态空洞对地层稳定性的影响进行了详细的比较和分析,并得出了相关结论。Sawangsurriya等[7]对泰国某高速公路路面纵向裂缝产生机理展开了研究,经过对裂缝下路基土取样试验,表明纵向裂缝主要是因为地下水导致土体干缩湿胀而造成的。3) 数值模拟方面:陶连金[8]等人利用PFC软件对北京市区道路地下空洞稳定性进行了研究。他们考虑了地下空洞尺寸、上覆土层厚度、施工扰动和土层条件等因素,并通过模拟分析了这些因素对空洞稳定性的影响。研究发现,地下空洞尺寸和上覆土层厚度是影响地表沉降的关键因素,当地下空洞尺寸增大或上覆土层厚度减小时,地表沉降值会先增大然后趋于稳定。Pan[9]等构建了带有典型隐藏缺陷的道路结构的数值模型,并分析了它们在GPR扫描剖面和扫描深度切片中的反射特性。

为进一步研究土体性质、降雨入渗、地面荷载等因素对地面塌陷的影响,本文利用FLAC3D数值模拟手段,根据典型地块地面塌陷调查的实际地质条件及诱发塌陷的主控因素,概化模型工况,模拟雨水下渗黄土湿陷工况下地面塌陷的形成过程,分析地层结构变形失稳进而形成地面塌陷的过程,进而分析

郑州市地面塌陷的形成机理[10] [11]。

2. 郑州市黄土湿陷区工况

郑州市湿陷性黄土分布在黄土台塬、丘陵岗地及山前冲洪积缓倾平原西部，由北向南大致分布于京广铁路、嵩山路以西，主要为浅部第四系晚更新统粉土，湿陷性黄土一般分布在地表以下 2~10 m，多为褐黄色、灰黄色粉土，具有大孔隙，含少量钙质结核及白色钙质网纹，节理发育。密度一般为 $1.5\sim 1.7\text{ g/cm}^3$ ，孔隙比一般为 $0.85\sim 1.10$ ，地基承载力一般为 $110\sim 150\text{ kPa}$ 。该区湿陷性黄土，其因原生微观结构为骨架结构，砂粒和粉粒含量多，而引起黄土的湿陷。

3. 地面塌陷数值模拟

3.1. 计算原理

本区湿陷性黄土自重湿陷系数均小于 0.015，为非自重湿陷性黄土。湿陷系数为 $0.015\sim 0.03$ ，湿陷量小于 300 mm，湿陷等级为 I 级(轻微)，湿陷深度约自然地面下 2~10 m。湿陷性黄土在浸水后力学强度尤其是抗剪强度降低，使土体结构发生变化，后在一定附加压力作用下，产生附加沉降量。模拟计算按照湿陷范围分以下两种模型：① 不考虑土层结构作用，模拟整体湿陷效果。② 假设湿陷是在有限范围内，模拟局部效果。且通过控制黄土层厚度和施加顶部荷载，进行研究。

3.2. 计算模型及参数

模型一：地质模型为上层湿陷性黄土，下层为粘性土(软弱土)，局部湿陷即试坑为上层蓝色部分，左右两侧为含水量小的湿陷性黄土，试坑内为含水量大的湿陷性黄土。分别考虑上覆黄土层厚度为 2 米、4 米、6 米、8 米、10 米时自重沉降、汽车等附加荷载时的沉降状况和上覆有杂填土层时的塌陷情况，模型一见图 1。

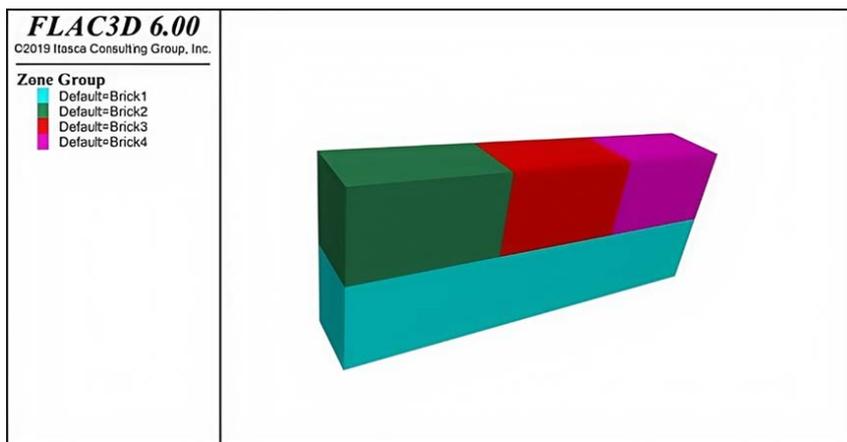


Figure 1. Local collapsible soil model

图 1. 局部湿陷性土体模型图

模型二：地质模型为整体湿陷，即上层是含水量较大的湿陷性黄土，下层为粘性土(软弱土)。分别考虑上覆黄土层厚度为 2 米、4 米、6 米、8 米、10 米时自重沉降和汽车等附加荷载时的沉降状况和上覆有杂填土层时的塌陷情况，模型二见图 2。

模型尺寸均为 $30\text{ m} \times 5\text{ m} \times 12\text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)。模型全部采用 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 六面体节单元。模型边界条件限制了模型两边水平位移及模型底边在竖向和水平方向的位移。

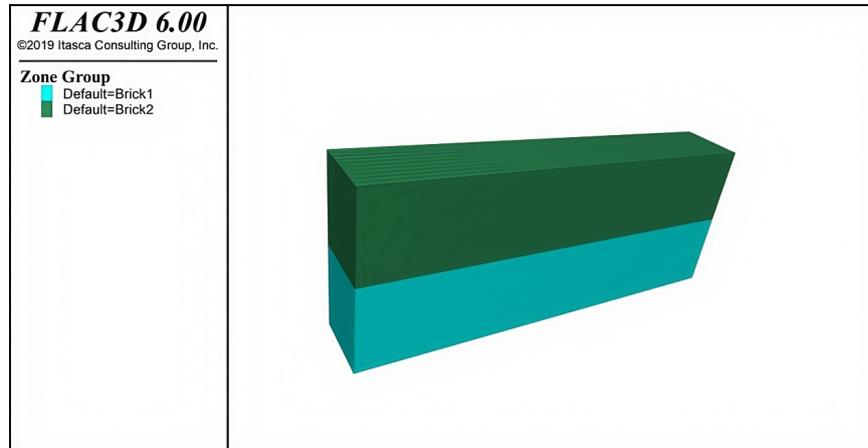


Figure 2. Overall collapsible soil model

图 2. 整体湿陷性土体模型图

因此，两种模型湿陷后参数选取见表 1：

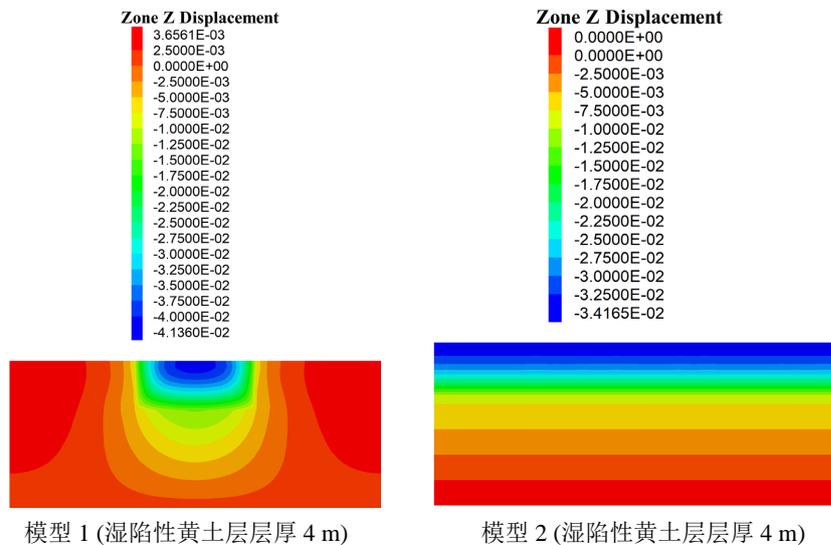
Table 1. Model parameter values

表 1. 模型参数值

	密度 g/cm^3	含水率%	体积模量 MPa	剪切模量 MPa	粘聚力 kPa	内摩擦角 $^\circ$
路基	2.50	/	8333	3846	200	40
杂填土	1.85	/	8.33	3.84	10	16
湿陷黄土(含水量高)	2.01	26.3	2.06	0.25	7.7	12.4
湿陷黄土(含水量低)	1.38	5.5	22.97	2.87	42	28.9
粘性土	1.95	20	17.5	3.75	50	19.3

3.3. 考虑不同厚度的湿陷性黄土层时

模型一和模型二湿陷变形云图见图 3：



模型 1 (湿陷性黄土层厚 4 m)

模型 2 (湿陷性黄土层厚 4 m)

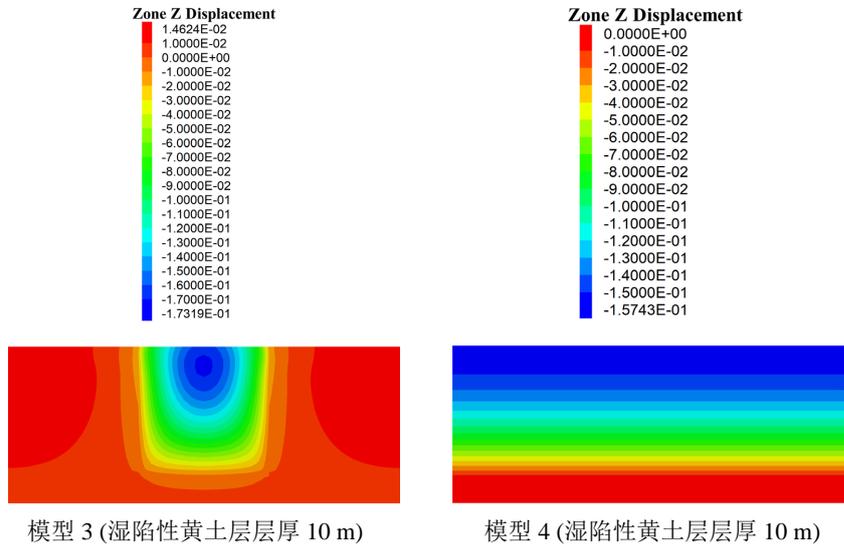


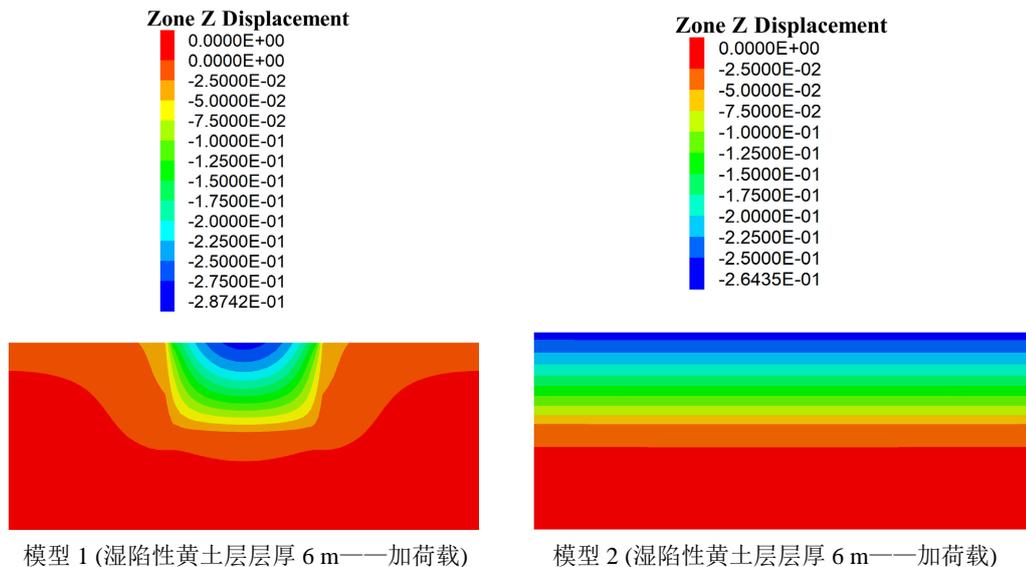
Figure 3. Simulation of collapsible loess layers of different thicknesses
图 3. 不同厚度的湿陷性黄土层模拟图

对图 3 分析可知，模型一在局部浸水范围内，浸水湿陷黄土和无湿陷黄土间形成一个“拱”，在湿陷区地层出现下沉，且在中心沉降大并向两边逐渐减小。根据不同厚度对比可知，湿陷性黄土层厚度越大，产生的沉降效果越明显，越容易对周边建筑物产生影响；模型二整体浸水范围内整个地层随着黄土湿陷均匀地往下下沉，在上覆湿陷性黄土层厚度为 10 m 时，湿陷沉降达到最大值为 157.43 mm。

3.4. 考虑汽车等附加荷载作用时

根据文献[12]-[14]，将车辆荷载考虑为静载时，车辆荷载简化为均布恒载，此时规定轮压大小为 0.7 MPa，将其简化为作用在模型顶面的均布荷载。以 6 米和 10 米黄土层为例，模拟见图 4：

对图 4 分析可知，在附加荷载作用下，地基及周围土体沉降仍表现为中间沉降大，两侧沉降小，基底最大沉降量约为 447.42 mm。模型二附加荷载均匀作用在整个土层上，产生均匀沉降，可达 463.63 mm。可见两种情况都会对实际工程的安全以及稳定产生很大的不利影响。



模型 1 (湿陷性黄土层层厚 6 m——加荷载)

模型 2 (湿陷性黄土层层厚 6 m——加荷载)

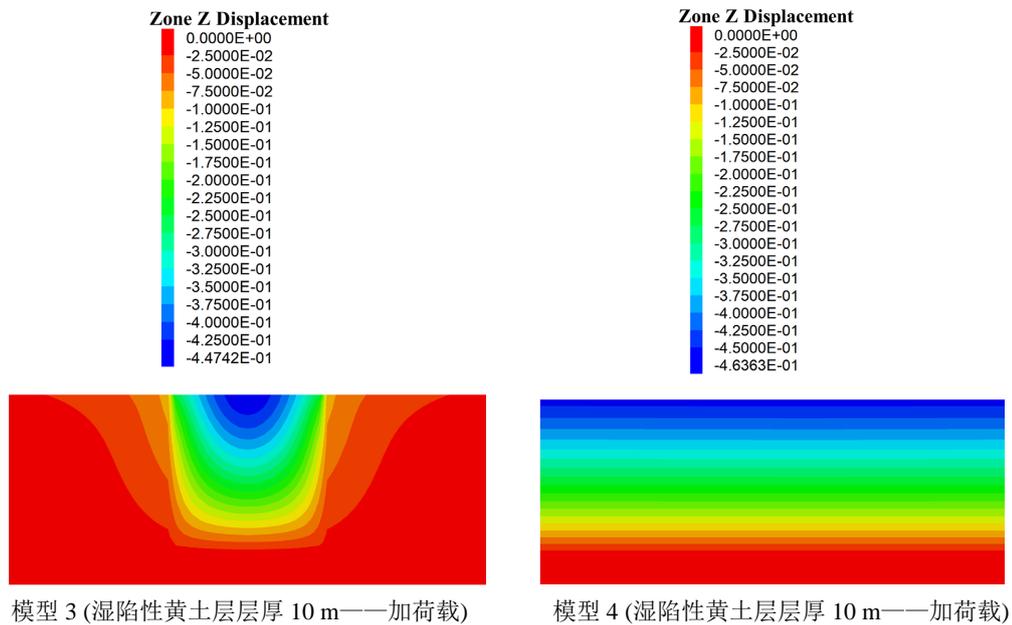


Figure 4. Simulation diagram of additional loads such as automobiles

图 4. 汽车等附加荷载作用模拟图

3.5. 考虑黄土层顶部有杂填土层和路基时

考虑到工程建设的需要,在郑州市湿陷性黄土区可能存在上覆地层有杂填土堆积和修建路基情况,研究两种模型在黄土层不同厚度下的变化情况,假定杂填土厚度为 2 米,路基厚度为 0.3 米,施加杂填土层后局部湿陷土体模型见图 5,施加杂填土层后整体湿陷土体模型见图 6。

考虑黄土层顶部有杂填土层和路基后模型湿陷变形云图见图 7。

对图 7 分析可知,模型二仍表现出地层随着下部黄土湿陷均匀地往下下沉,沉降量随着黄土层厚度的增加而增大。模型一各土体仍是在局部水体浸润区产生较大位移,中间大两边小,但是最大沉降并未出现在地面,在地层中可能会出现“踏空”现象。当踏空区逐渐积累到一定程度时,可能会导致上覆土体局部突然下沉,产生地面塌陷。

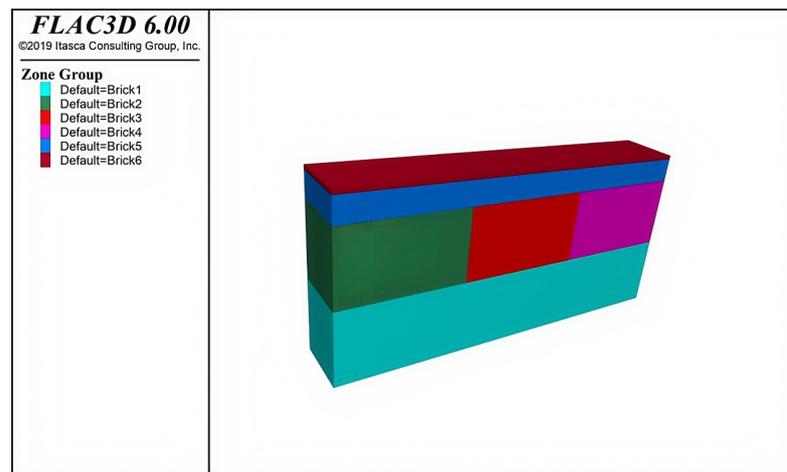


Figure 5. Model of local collapsible soil after applying mixed fill soil layer

图 5. 施加杂填土层后局部湿陷土体模型图

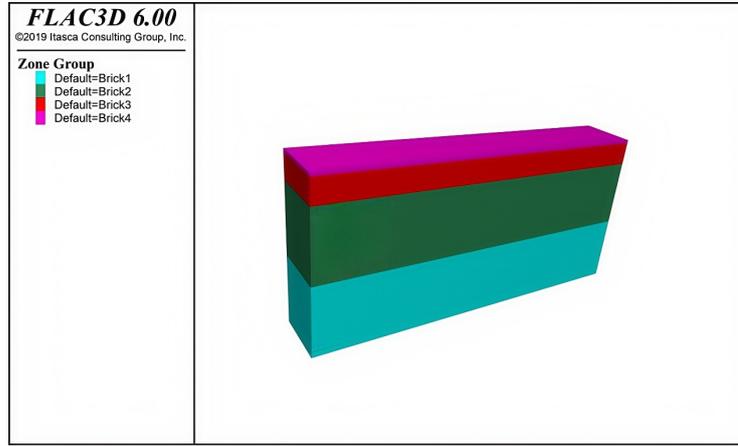


Figure 6. Overall collapsible soil model after the application of mixed fill soil layer
 图 6. 施加杂填土层后整体湿陷土体模型图

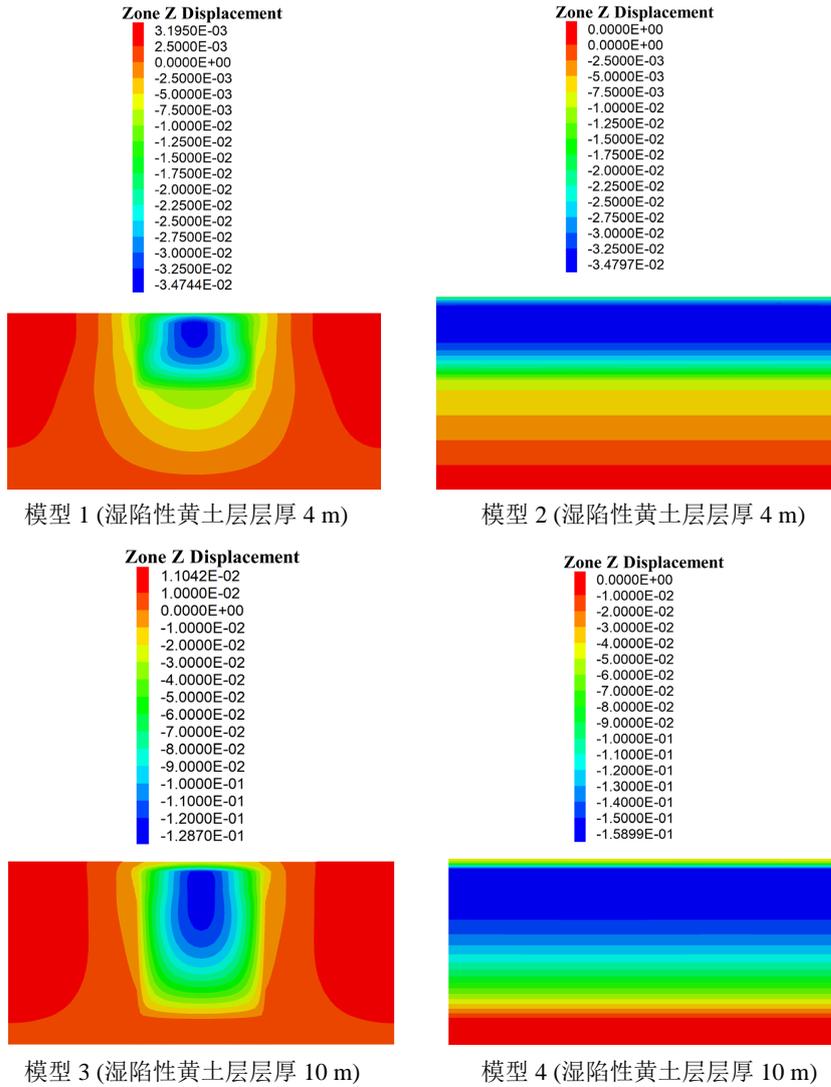


Figure 7. Simulation diagram with mixed fill and subgrade at the top of the loess layer
 图 7. 黄土层顶部有杂填土层和路基时的模拟图

4. 结论

- 1) 对于与郑州地质特征类似的黄淮平原区来说, 水带动土的流失是引发地面塌陷的关键原因。
- 2) 在湿陷性黄土地区, 当上覆土层为湿陷性黄土层时, 无论是局部浸润饱和还是整体浸润饱和, 黄土的湿陷沉降均随着黄土厚度的增大而增大。
- 3) 当在湿陷性黄土层上部路面施加交通荷载时, 湿陷仍表现为荷载中心沉降大, 两侧沉降小。但沉降量随着交通荷载的增大急剧增加, 对实际工程的安全以及稳定产生很大的不利影响。
- 4) 若在湿陷性黄土层上覆杂填土层时, 浸水饱和后由于不同地层沉降量的差异可能会形成地下空洞, 当空洞逐渐积累到一定程度时, 可能会导致上覆土体局部突然下沉, 产生地面塌陷。
- 5) 建议加强地面塌陷的地质背景调查和原因分析研究工作, 加强地面塌陷的预测预报工作, 提高应对不同地质分区抗塌陷建设的能力。

参考文献

- [1] 刘文. 上海道路地面塌陷统计及机理分析与风险防控[J]. 城市道桥与防洪, 2024(7): 1-7.
- [2] 付栋. 上海地面塌陷研究与风险防控探讨[J]. 城市与减灾, 2023(6): 45-49.
- [3] 殷杰. 城市道路地下管道渗漏引发地面塌陷模型试验研究[J]. 江西建材, 2023(4): 70-72.
- [4] 钟世英, 丛波日. 城市地面塌陷灾害成因机理分析及分类[C]//2015(第二届)城市防洪排涝国际论坛论文集. 2015: 62-66.
- [5] 张峰. 基于 ANFIS 方法的道路塌陷预测[J]. 山西建筑, 2023, 49(16): 130-132.
- [6] 余乐. 城市地层不同形态空洞失稳破坏机制的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [7] Sawangsuriya, A., Jotisankasa, A. and Anuvechsirikiat, S. (2012) Classification of Shrinkage and Swelling Potential of a Subgrade Soil in Central Thailand. In: Mancuso, C., Jommi, C. and D'Onza, F., Eds., *Unsaturated Soils: Research and Applications*, Springer, 325-331. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31116-1_44
- [8] 陶连金, 袁松, 安军海. 城市道路地下空洞病害发展机理及对路面塌陷的影响[J]. 黑龙江科技大学学报, 2015, 23(3): 289-293.
- [9] Pan, J., Shi, Z., Meng, X., Yue, Y., Lin, C., Chen, J., *et al.* (2023) Reflection Characteristics of Typical Road Defects in 3D GPR Images for Collapse Mitigation. *Journal of Applied Geophysics*, **217**, Article 105166. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.105166>
- [10] 刘贤红, 宁进锡, 刘显丽. 邵东市城区地面塌陷发育特征及成灾机理研究[J]. 价值工程, 2022, 41(24): 78-80.
- [11] 刘道涵, 张欣, 何军, 等. 地面核磁共振测深方法在武汉市岩溶地面塌陷探测中的应用研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(1): 13-20.
- [12] 郭宇, 周心经, 郑小战, 等. 广州夏茅村岩溶地面塌陷成因机理与塌陷过程分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 54-59.
- [13] 裴晓东. 某地区地面塌陷成因分析及防治[J]. 现代矿业, 2019, 35(8): 246-247.
- [14] 李才华, 窦鹏冲. 岩溶地面塌陷致塌机理的物理模型试验分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54(S2): 239-242.