

湿陷性黄土微观力学特征及其路基沉降规律

肖文斌¹,李靖²,武科^{1*},王志强²,许文彬¹,刘大鹏¹,张智棋¹,沈平²

(1.山东大学土建与水利学院,山东 济南 250061; 2.中国电建市政建设集团有限公司,天津 300384)

摘要:依托朔州市南环路黄土路基改扩建工程,基于电镜扫描试验和颗粒流数值模拟分析,研究孔隙率的差异性导致湿陷性黄土微观结构特征及其应力变化规律。采用宏观数值计算方法,建立湿陷性黄土公路路基施工力学三维模型,研究公路改扩建工程湿陷性黄土路基沉降规律,探讨路基参数对新旧路基沉降的影响效应。研究表明:湿陷性黄土颗粒主要分为散粒和凝块,其颗粒接触关系主要有3种:支架接触、镶嵌接触以及分散分布,其中,支架接触结构受含水率影响最大。在不同围压条件下,不同孔隙率的湿陷性黄土试样在加载过程中经历了4个发展阶段,并且孔隙率对湿陷性黄土峰值剪切强度以及剩余强度影响显著。新旧路基最大沉降和变形受路基加宽宽度和路堑挖深高度影响,且保持同增同减的关系;地基强度越高,新旧路基沉降变形越小。地下水位越高,黄土的湿陷性越明显,新旧路基沉降越大。

关键词:湿陷性黄土;路基;沉降变形;离散元;有限差分

中图分类号:TU443

文献标志码:A

引用格式:肖文斌,李靖,武科,等.湿陷性黄土微观力学特征及其路基沉降规律[J].山东大学学报(工学版),2024,54(2):163-173.

XIAO Wenbin, LI Jing, WU Ke, et al. Micromechanical characteristics of collapsible loess and its subgrade settlement law[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(2):163-173.

Micromechanical characteristics of collapsible loess and its subgrade settlement law

XIAO Wenbin¹, LI Jing², WU Ke^{1*}, WANG Zhiqiang², XU Wenbin¹, LIU Dapeng¹, ZHANG Zhiqi¹, SHEN Ping²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. China Power Construction Municipal Construction Group Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: Relying on the loess subgrade reconstruction and expansion project of Shuozhou South Ring Road, based on the scanning electron microscope test and Grain flow numerical simulation analysis, the microstructure characteristics and stress changes of collapsible loess caused by the difference of porosity were studied microscopically. A three-dimensional model of construction mechanics for collapsible loess highway roadbed was established using macroscopic numerical calculation methods. The settlement law of collapsible loess roadbed in highway reconstruction and expansion projects was studied macroscopically, and the effect of roadbed parameters on uneven settlement deformation of new and old roadbeds was explored. The research results were indicated that collapsible loess particles were mainly divided into loose particles and agglomerates, and their particle contact relationships mainly included: support contact, inlaid contact, and dispersed distribution. Among them, the support contact structure was most affected by the moisture content. Under different confining pressure conditions, collapsible loess samples with different porosities went through four stages of development during the loading process, and the porosity had a significant impact on the peak shear strength and residual strength of collapsible loess. The maximum settlement and deformation of both new and old roadbeds were affected by the widening width of the roadbed and the depth of the excavation, and maintain a relationship of equal increase and decrease. The foundation strength was higher, and the settlement deformation of the new and old roadbeds was smaller. The groundwater level was higher, and the collapsibility of loess was more obvious, and the settlement of new and old roadbeds was greater. The higher the groundwater level, the more obvious the collapsibility of loess, and the greater the uneven settlement of new and old roadbed.

Keywords: collapsible loess; subgrade; settlement deformation; discrete element; finite difference

收稿日期:2022-11-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52179106)

第一作者简介:肖文斌(1997—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为结构工程。E-mail:202135057@mail.sdu.edu.cn

*通信作者简介:武科(1978—),男,河北枣强人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向为岩土工程。E-mail:wuke@sdu.edu.cn

0 引言

随着城市交通中车辆流量的增加,现有的很多城市道路路面结构受损严重,许多城市道路已经不能满足交通量和经济发展的需求,甚至已经成为制约经济发展的因素^[1]。虽然通过道路改建扩建提高了道路质量,但是路基拓宽过程中不可避免地导致新旧路基之间的沉降差异^[2]。尤其对湿陷性黄土地区公路建设,如果未能充分评估区域地质力学特征、合理预测变形规律,必然影响公路建设质量和运营安全,甚至会造成不可挽回的经济损失。为此,国内外学者进行了大量的研究工作:方元伟^[3]依托工程现场监测数据,分析了高速公路在路基拓宽时的稳定性;叶万军^[4]提出了黄土地区城市道路病害应当充分考虑动载促渗效应对工程的影响;Zhen等^[5]提出在湿陷性黄土掺入混凝土碎石,试验发现随着混凝土比例的增加,其内部结构稳定性也同步增加;韩若楠^[6]依据实际工程,提出了区别于传统水平施工方法的分部填筑法,并与传统水平分层填筑方法进行对比分析;Jia等^[7]研究了湿陷性黄土在遇水条件下各向同性应力作用下的变形特性;钟秀梅等^[8]通过对不同配合比的粉煤灰改良黄土试样进行动残余变形、动强度影响试验,提出了粉煤灰改良黄土应用时的最优配比;Ma等^[9]采用动剪应变评价法,进一步验证了水泥和石灰改良黄土可以满足作为基床底层填料时的长期动力稳定性;在数值模拟研究方面,张溯^[10]探讨了高速公路新旧路基差异沉降的影响因素,并对水泥土搅拌桩处治湿软地基提出了改进建议;方元伟^[3]通过现场数据与数值模拟结果进行对比,分析了新旧路基沉降变形,提出了一种适用于路基拓宽工程的不均匀沉降控制标准;Giomi等^[11]采用 Comsol Multiphysics 软件中扩展的巴塞罗那基本模型进一步精确模拟了湿陷性黄土水淹前后力学行为的改变,并验证了采用该模型进行模拟的可行性。

然而,湿陷性黄土微观力学特征及其路基沉降规律方面的研究还有待进一步完善。本研究依托朔州市南环路黄土路基改扩建工程,基于电镜扫描试验和颗粒流 (particle flow code, PFC3D) 模拟分析,微观研究孔隙率的差异性导致湿陷性黄土微观结构特征及其应力变化规律。采用有限差分 (fast lagrangian analysis of continua, FLAC3D) 宏观数值计算方法,建立湿陷性黄土公路路基施工力学三维模型,宏观研究公路改扩建工程湿陷性黄土路基沉

降规律,探讨路基参数对新旧路基不均匀沉降变形的影响效应。

1 湿陷性黄土微观力学特征研究

1.1 工程概况

朔州市南环路位于起步区北侧,西起经一路(K0+000),一直向东延伸,与经八路(K4+790.193)交汇为止,南环路现状路基宽度为24.0 m,本次改建是对已有旧路进行拓宽改造施工,设计拓宽改造后宽度为45 m,道路全长约4.79 km,设计扩建为双向六车道,如图1、2所示。本区间内地貌形式主要为冲洪积平原地貌,地形有一定程度的起伏,地形西南高,东北低,勘察期间测得各勘探点标高1 061.30~1 087.87 m,最大高差26.57 m。根据地质勘察可知,地基石自上而下可划分为3层,第1层为素填土,第2层为黄土状粉土,第3层为粉土。地下水为孔隙潜水,水位埋深1.9~9.0 m,水位标高1 064.07~1 078.01 m,地下水年变幅约0.5 m。南环路改扩建工程包括部分老路基挖除以及新路基填筑两个过程,选取典型路段(K2+635.143)截面进行模拟分析。

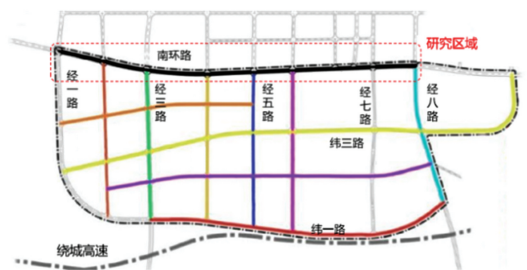


图1 南环路施工位置图

Fig.1 Construction location map of South Ring Road

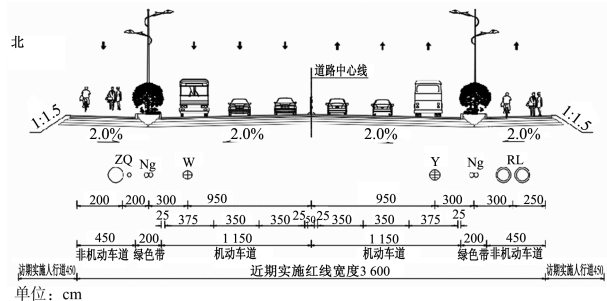


图2 南环路断面图

Fig.2 Section of South Ring Road

1.2 湿陷性黄土微观结构分析

引起黄土湿陷的因素很复杂,直到现在各位专家学者也未能给出统一的定论,仅仅从宏观角度来研究黄土是远远不够的,许多学者认为黄土宏观力学特性与微观结构存在着十分紧密的联系,毕美

乐^[12]对黄土微观角度湿陷机理展开讨论,分析了粉粒、黏胶粒以及团聚体对黄土湿陷性的影响。罗浩等^[13]对黄土孔隙的分布规律进行分析,解释了不同大小架空孔隙的破坏特性。井彦林等^[14]采用多种微观方法对天然黄土进行分析,发现了黄土浸水饱和前后孔隙变化的规律,解释了黄土内部孔隙对湿陷性的影响程度。李凡等^[15]分析了人工制备的黄土在微观结构中影响土体湿陷的不同因素。陶春亮^[16]采用电子计算机断层扫描技术研究了不同条件下的湿陷性黄土,得出孔隙中的连通孔隙体积是影响黄土湿陷性的主要因素。因此,采用岩土微结构研究方法,开展针对黄土湿陷性评价方法的研究,建立黄土湿陷性与微观结构的关系,是全面认识黄土湿陷特性的有效途径。

为此,以位于朔州经济开发区市政路网及配套市政管线工程所在区域的黄土为研究对象,利用微结构电镜扫描图像,从微观结构上对黄土的湿陷变形特性进行分析,当黄土浸水受压时,在水和外部压力的共同作用下,探究黄土颗粒中的集粒、团粒结构破坏特征,揭示高黄土的微结构而发生的崩溃湿陷机理。

1.2.1 电镜成像试验

黄土的微结构主要为颗粒组成、排列特征和土颗粒联结特征等,因此从黄土的颗粒形态、孔隙特征和土颗粒的胶结程度来研究黄土颗粒特征。多孔隙结构是黄土特有的微观结构特征,粒间孔隙是引起黄土湿陷的主要原因。为此,针对11个黄土试样样本(按含水率为5%设置梯度对照试样)、110个样本点进行了扫描观察,并成功获得清晰、有价值的扫描图像400多张。

为了能真实具体观测到湿陷性黄土的结构,在试样制备过程中尽可能保留土样原有的状态,保证土样的干燥以及良好的导电性。试样的制备方法

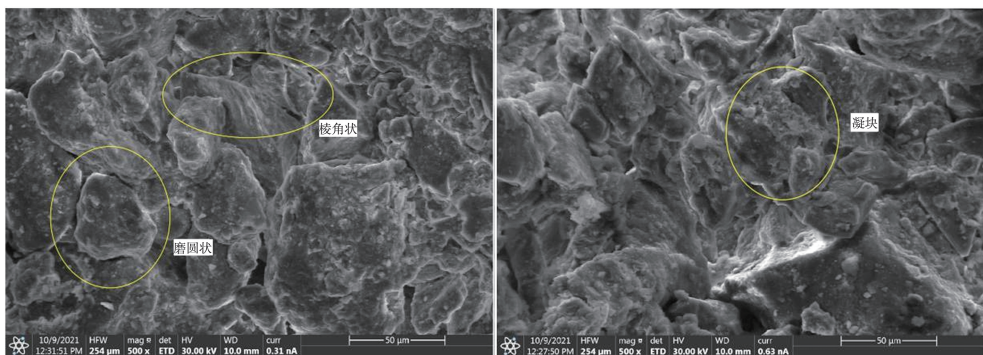
如下:

- (1) 选取试样粗胚(长、宽、高分别为30、20、15 mm);
- (2) 干燥处理选用的微观试样粗胚(试验选用风干法,即试样粗胚在阴凉通风处完成自然脱水);
- (3) 将微观试样进行浸泡和硬化;
- (4) 对硬化后的试样进行切割、研磨及抛光;
- (5) 对上述测片镀膜(土样制成的测片导电性差,易影响图像质量)。

利用扫描电子显微镜对原状土和不同含水率的土试样进行扫描,选择观测效果较好的区域获取放大500~2500倍的微观图像。放大500倍,视野内土体颗粒数量充足,便于试样整体分析统计。放大2500倍时,扫描电镜视野内能够观察到土颗粒的局部支撑结构和颗粒孔隙之间的连结方式,有助于准确观察土体微观结构。由于拍照点观测范围有限,为了能够完整客观地反映整块试样的微观结构组成,对试样进行3×3网格划分,并均匀取9个观测点。为了避免重复调焦,按照由大到小的放大倍数进行连续的扫描成像。

1.2.2 湿陷性黄土微观结构定性分析

图3为试样扫描电镜放大500倍时获得的照片。标尺为50 μm时,能较为准确的观测到颗粒的结构形态,黄土试样的颗粒粒径大多约为30 μm,较大的颗粒可达到80 μm,多为散粒和凝块两种颗粒结构形态。散粒颗粒中一部分呈现出棱角分明的形态,扫描图像中轮廓清晰可见,另一部分颗粒棱角被磨圆,且在颗粒表面附着一些絮状物质;凝块状颗粒是由少量黏土碎屑和土体中的碳酸盐胶结而成,粒径远大于散粒状颗粒,外观多表现为团块状、圆球状。凝块在受到压力和水的作用时,凝块颗粒会吸水膨胀,颗粒间的胶结作用减弱,部分凝块分散为小粒径的散粒。



(a) 颗粒单元形态一

(b) 颗粒单元形态二

图3 黄土颗粒单元形态

Fig.3 Morphology of loess particle units

湿陷性黄土颗粒的接触关系图如图4所示。如图4(a)所示,湿陷性黄土骨架颗粒间的接触关系主要有3种,即支架接触、镶嵌接触和分散分布。支架接触结构较为松散,支点处胶结的黏土矿物碎屑和碳酸盐等体现结构稳定性,粒间孔隙较大,结构稳定性较差。如图4(b)所示,镶嵌接触结构颗粒堆积

较为紧密,颗粒之间纵横交叉,呈现出镶嵌状,骨架颗粒间能够产生较多的接触支点,结构稳定性较好。如图4(c)所示,含有黏粒较多的土体中骨架颗粒较为稀疏,黏粒物质充满骨架颗粒之间,颗粒保持分散状态,此类土体表面多被絮凝状的次生矿物包裹。

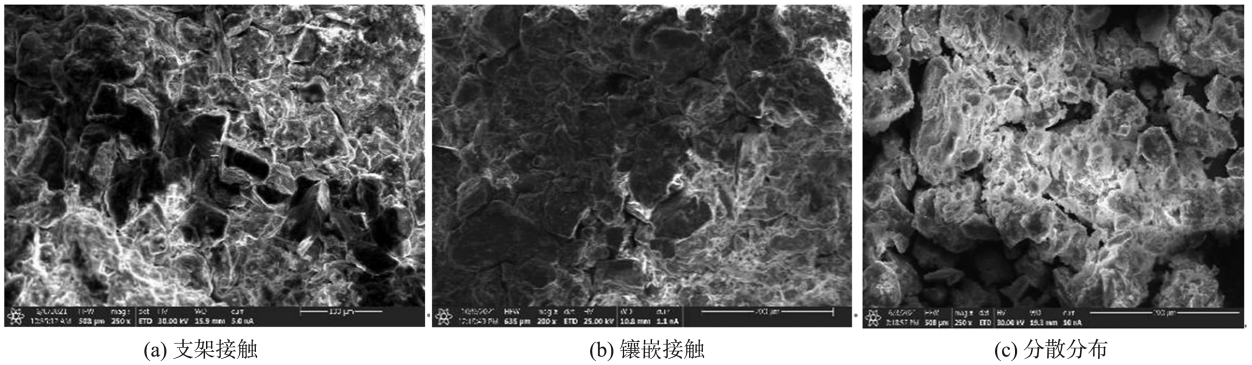


图4 湿陷性黄土颗粒接触方式
Fig.4 Contact mode of collapsible loess particles

1.3 基于 PFC3D 的湿陷性黄土应力变化规律分析

基于电镜扫描试验得到的湿陷性黄土微观结构特征,采用颗粒程序 (particle flow code, PFC) 建立三维湿陷性黄土颗粒状态模型,通过模拟三轴试验过程,探讨不同围压状态下孔隙比对湿陷性黄土应力变化的影响。

1.3.1 湿陷性黄土颗粒状态模型

湿陷性黄土颗粒状态模型采用线性接触模型,利用圆筒模型来约束土体颗粒。三轴模型尺寸高为 40 mm,直径为 20 mm。为减少计算量,采用半径放大法建立黄土结构颗粒模型试样,颗粒粒径范围为 0.75~1 mm,均匀分布。PFC 材料由接触处相互作用的刚性球组成。根据颗粒之间作用的接触模型将这些材料定义为线性、接触黏结、平行黏结或节理模型。线性模型仅适用于散体材料,其他几种模型适用于胶结型材料,因此模拟黏性土土体时一般选用接触黏结模型。颗粒黏结方式为接触黏结,颗粒流模型试样如图5所示。由于 PFC3D 中颗粒的数量直接影响数值试验耗费的计算时间和模拟的可行性,在模拟砂土室内试验时,如果完全按照实际试样的颗粒数来模拟,影响试验可操作

性。当试样外观尺寸和试样内部颗粒平均半径的比值大于 30 时,颗粒数基本不影响数值模拟结果。模型试样包含 2 846 个颗粒,因为黄土土体抗压、抗剪,但不抗拉,一般选用线性接触模型或者接触黏结模型,本研究选用接触黏结模型,并参考微观参数对模型赋值。模型边界墙体的法向刚度为 100 MPa,颗粒法向刚度 65 MPa,墙体切向刚度为 100 MPa,颗粒切向刚度采用 65 MPa。为保证模型成样是颗粒不会穿过墙体,墙体刚度要远大于颗粒刚度。模型细观参数见表 1 所示。

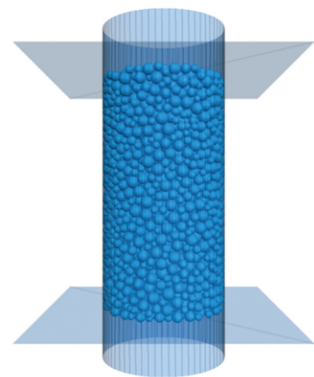


图5 三轴数值试验试样模型
Fig.5 Sample model for triaxial numerical test

表1 颗粒流数值模拟参数

Table 1 Grain flow Numerical simulation parameters

颗粒密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	初始孔隙率	摩擦系数	法向黏 结强度/MPa	切向黏结 强度/MPa	刚度比	变形模量/ MPa	阻尼比
2 710	0.25	0.45	35	1.2	1.0	65	0.7

模拟三轴剪切实验时,需要对试样施加围压,通过运行伺服控制程序来保持围压的稳定,试验的上下

两侧水平墙为加载板,因为不能对墙体直接施加压力,所以对墙体施加速度的方式来对试样提供压力,

侧面圆柱形墙体同理。加载速度设定为0.05 m/s。当试样的轴向应变增加到 20%时终止加载。本次模拟在 4 种围压条件下加载,分别为 100、150、200、250 kPa,在模拟试验中记录下试样加载过程中的偏应力、轴向应变、轴向应力、模型试样体应变等参数。

1.3.2 不同孔隙率对湿陷性黄土应力变化影响

为了研究孔隙率对黄土抗剪强度及变形的影响敏感性,本研究围压为 100、150、200、250 kPa 下,试样孔隙率为 0.25、0.35 和 0.45 进行三轴模拟试验,应力-应变曲线如图 6 所示。因为 PFC 模型是从颗粒层面观察土体的变形,加载过程中颗粒的波动会引起试验数据的波动。由图 6 可知,模型试样在加载过程中经历了 4 个发展阶段:① 孔裂隙压密阶段。由于土体存在天然孔裂隙等初始损伤,而黄土土体多为大孔隙结构,在三轴实验过程中,试样被不断加压时,颗粒之间的孔隙不断减小,因此该阶段的应力-应变曲线表现为上凹型,该阶段加载过程中,横向应变远远小于轴向应变,几乎为 0。② 弹性变形阶段。土体孔隙减少后,颗粒之间的摩擦增加,表现为轴向应力与轴向应变基本维持线性关系,基本满足胡克定律。在土体压密之后,孔裂隙减小,土体颗粒摩擦增加,微裂隙面之间压缩,减少了土体颗粒相互错动,试样形变表现为弹性形变。③ 变形局部化阶段。试样内部开始产生、扩展大量裂隙,裂隙逐渐联

结,由微观分布开始向宏观裂隙过渡。应力-应变曲线变化较为明显,斜率开始变缓,轴向应力即将到达最大值,并且环向应变的变化速率明显加快。④ 应变软化阶段。模式受力持续增加,达到极限后试样开始出现肉眼可见的裂纹,此时的土体发生明显破坏,土体承载能力丧失,由内部的裂隙面继续承担荷载。其他细观参数不变的条件下,孔隙率的改变对试样的变形产生的影响很明显。随着孔隙率的增加,试样强度峰值随之减小,且强度峰值对应的轴向应变有所增加。黄土的应力-应变曲线在孔隙率较低时表现为应变软化型,随着孔隙率的增大,应力-应变曲线逐渐表现为应变硬化型。不同围压条件下孔隙率的改变,对试样峰值抗剪强度的影响规律基本保持一致,选取围压 100 kPa 作为代表进行分析,当孔隙率为 0.25 时,加载过程中剪切破坏形式为脆性破坏,当孔隙率为 0.45 时,加载过程中强度峰值对应的竖向应变大幅增加。当孔隙率从 0.25 增加到 0.35 时,抗剪强度峰值从 209.60 kPa 减小到 163.20 kPa,减小幅度为 22.1%;剩余强度从 151.15 kPa 减小到 118.52 kPa,减小幅度为 21.6%。当孔隙率从 0.35 增加到 0.45 时,抗剪强度峰值从 163.20 kPa 减小到 158.19 kPa,减小幅度为 3.1%。剩余强度从 118.52 kPa 减小到 117.81 kPa,减小幅度为 0.6%。所以,孔隙率的变化将对黄土峰值剪切强度和剩余强度产生显著影响。

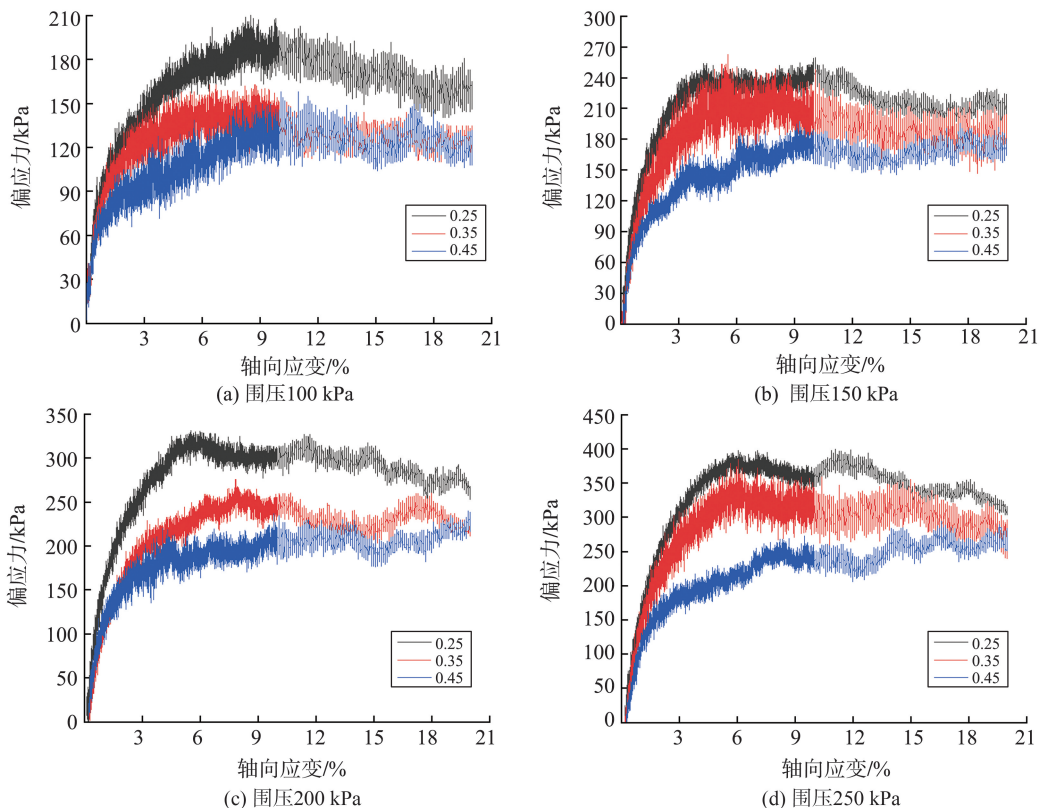


图 6 孔隙率对应力-应变曲线的影响
Fig.6 Effect of porosity on stress-strain curve

2 公路改扩建工程湿陷性黄土路基沉降规律

2.1 数值模型与分析方法

综合考虑本扩建工程所采用的双侧对称拓宽、对称载荷、计算效率以及边界效应的影响因素,基于FLAC^{3D}数值计算软件,采用对称模型建立湿陷性黄土公路路基施工力学三维模型。模型长度为35 m,高度为35 m,旧路基深度为1 m,长度为12 m;开挖时采用台阶式分层开挖挖除4 m原有旧路基,旧路基开挖深度为3 m,水位高度为地下2 m。地层模型参数直接使用FLAC^{3D}命令流进行范围赋值,共分为3层,实际工况下线路最大坡度为20‰,如图7所示。参考地质勘探报告以及相关的数值模拟经验,土体共分为3层,从上至下分别为素填土、黄土状粉土、粉土,深度分别为1、4、30 m。地层模型均采用摩尔-库伦模型,新路基采用线弹性模型,各材料力学参数如表2所示。

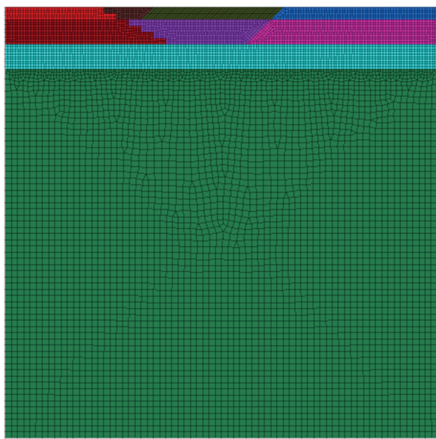


图7 数值模拟模型图

Fig.7 Numerical simulation model diagram

表2 材料参数表

Table 2 Material parameters table

土层	体积模量/ MPa	剪切模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	密度/ (kg·m ⁻³)
旧路基	40.0	13.0	30.0	28.0	2 000
黄土	17.0	6.2	20.0	22.0	1 470
新路基	1 700.0	68.0	0	35.0	1 500
饱和黄土	3.4	1.2	12.0	10.0	1 470
亚黏土	16.0	6.5	4.1	13.5	2 400

数值分析过程如下:(1)模型边界条件为底部全约束,侧面法向约束。(2)重力加速度9.8 m/s²,计算精度为1×10⁻⁴,初始地应力平衡后进行路基开挖模拟。(3)从距离道路中心处8 m以外旧路基开

始挖除,挖除宽度为16 m,路基开挖为台阶式分层开挖。新路基填筑方式为每0.5 m分层压实填筑。(4)监测点设置在路基顶面与路基底面,每隔1 m设置一个监测点。

2.2 数值计算结果分析

2.2.1 拓宽宽度对新旧路基差异沉降的影响

由于路基两侧对称,因此取单侧路基研究分析。根据依托项目的具体情况,取旧路基宽12 m,模拟单侧加宽宽度分别为8、16、24、32 m,旧路基高设置为1 m,路堑边坡坡率均为1:1,不同加宽宽度条件下路基变形规律如图8、9所示(图中数据负值表示土体产生下沉,正值表示土体产生的隆起)。

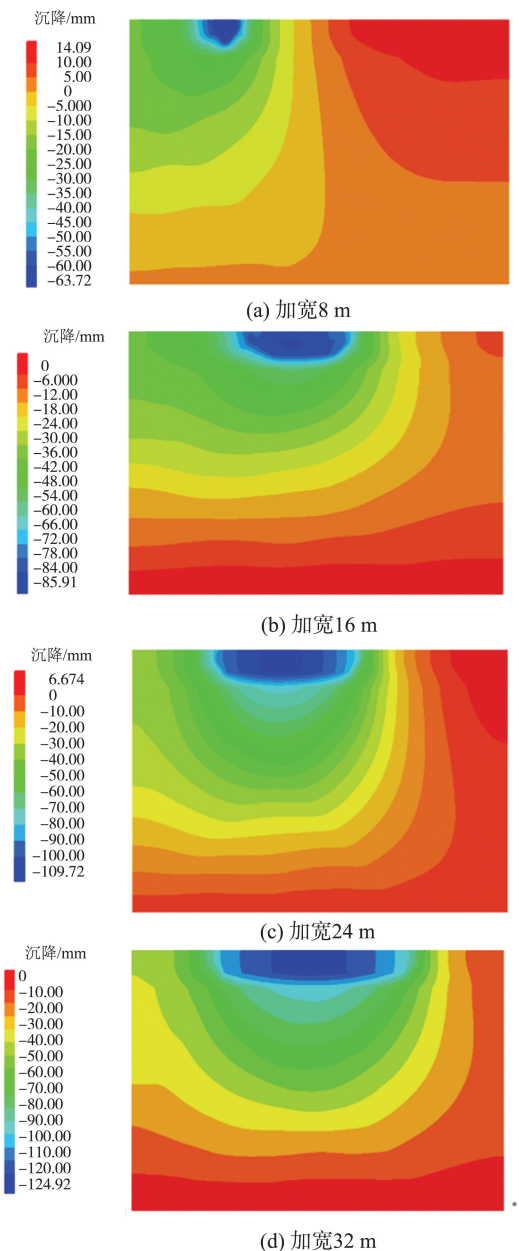


图8 拓宽宽度引起的路基沉降云图

Fig.8 Cloud map of roadbed settlement caused by widening width

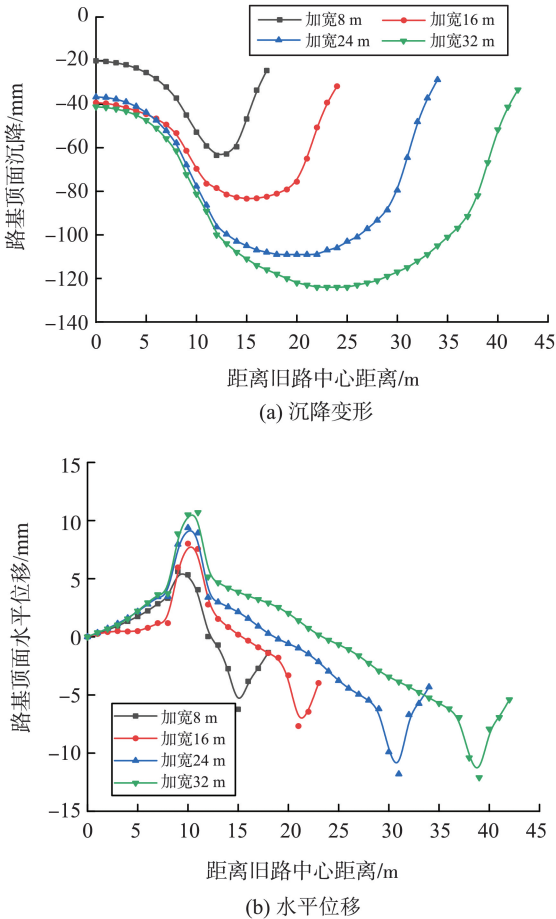


图9 拓宽宽度引起的路基顶面变形规律
Fig.9 Deformation law of roadbed top surface caused by widening width

由图8、9可知,新旧路基不均匀沉降与路基

加宽宽度呈正相关关系,新路基对近距离范围内的路面产生明显影响,路面整体也产生了一定程度的附加沉降。在加宽宽度分别为8、16、24、32 m时,对应的新路基的最大沉降分别为6.35、8.34、10.90、12.40 cm,相对于加宽宽度6 m时,最大沉降增幅为31.3%、85%、71.653 5%、95.275 5%;旧路基沉降分别为2.01、3.93、3.67、4.12 cm,新旧路基最大沉降差分别为4.34、4.41、7.23、8.28 cm,相对于加宽宽度6 m时,最大沉降差增幅为1.612 9%、66.589 8%、90.783 4%。即加宽路基的最大竖向变形和旧路基沉降差极限均与加宽宽度为正相关的关系,且随加宽宽度的增加新旧路基的沉降差增大的更为突出。路基层表面的水平位移呈对称状分布,且水平位移与加宽宽度为正相关变化关系,在新旧路基结合处距离2 m处水平位移最大。

2.2.2 填筑高度对新老路基差异沉降的影响

公路作为连接各大城市的主要线路,往往需要穿越各种高低不同的地形,因此同一条公路不同标段的路基填筑高度存在差异。路基高度不同,对地基的作用力大小不同引起的变形也就存在差异。因此,研究路基的填土高度对新老路基变形特性的规律是必要的。根据依托项目的具体情况,取旧路基宽8 m,单侧新加宽宽度16 m,路堑边坡坡率均为1:1,分别对路堑挖高2、3、4、5 m四工况进行模拟分析,如图10、11所示。

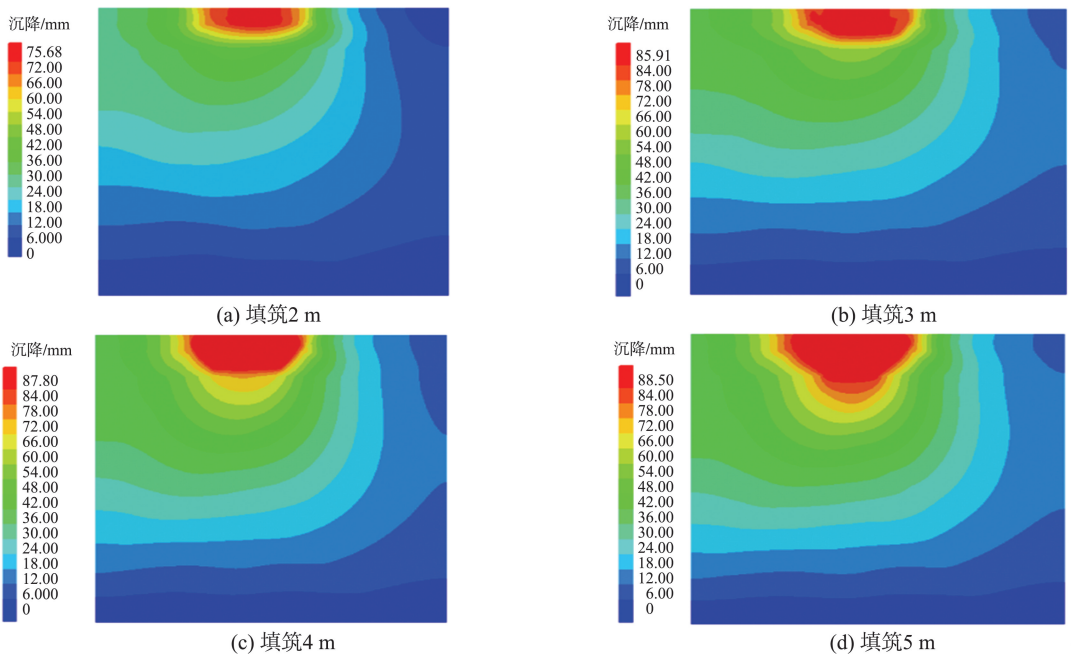


图10 填筑高度引起的路基沉降云图
Fig.10 Cloud map of roadbed settlement caused by filling height

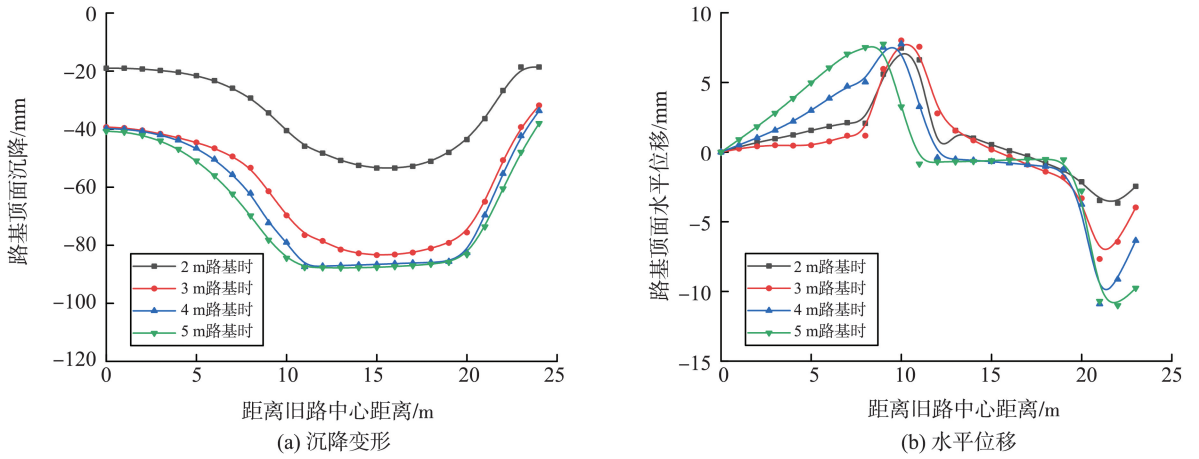


图 11 填筑高度引起的路基顶面变形规律
Fig.11 Deformation law of roadbed top surface caused by filling height

由图 10、11 可知:加宽路基的沉降变形与路基填筑高度呈正相关的变化关系。旧路中心路基随填土高度的增加,产生附加沉降逐渐增大,其原因为填土高度的增大使竖向附加应力增大。路堑挖高 2、3、4、5 m 时,新路基的最大沉降分别为 5.34、8.34、8.66、8.78 cm,相对于填土高度为 3 m 时,沉降增幅分别为 -35.971 2%、3.836 9%、5.275 8%,新旧路基最大差异沉降分别为 3.4、4.41、4.68、4.71 cm。相对于路堑挖高为 3 m 时,最大差异沉降增幅为 21.995 5%、6.122 4%、6.802 7%。路基表面的水平位移与路基填土高度呈正相关,最大水平位移发生在新旧路基结合部附近,且路基高度的增大使最大水平位移逐渐向

路基坡脚侧移动。

2.2.3 地基弹性模量对新老路基差异沉降的影响

公路加宽项目中,对路基而言除了有自重沉降,还有人为的机械压实,所以施工后沉降会较少。然而地基的压实工程通常做得不是很彻底,会产生较大的沉降,且不同类型的地基土在相同荷载下沉降也不完全一样。由于地基是道路的基础,地基的稳定性对道路的稳定性至关重要,因此有必要对不同的地基弹性模量进行模拟分析。为了研究不同地基弹性模量对路基变形的影响,选择在原始地基土的基础上地基弹性模量为分别减少 2 MPa、减少 1 MPa、增加 1 MPa 和 2 MPa 的地基弹性模量,不同地基弹性模量下路基变形云图如图 12、13 所示。

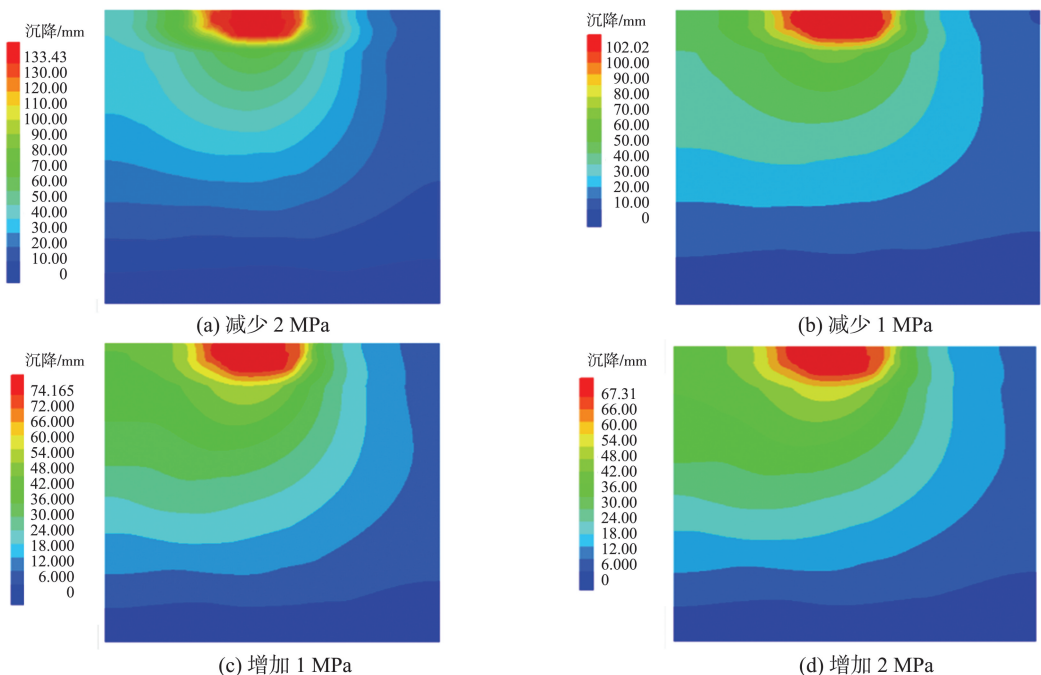


图 12 地基弹性模量引起的路基沉降云图
Fig.12 Cloud map of roadbed settlement caused by elastic modulus of foundation

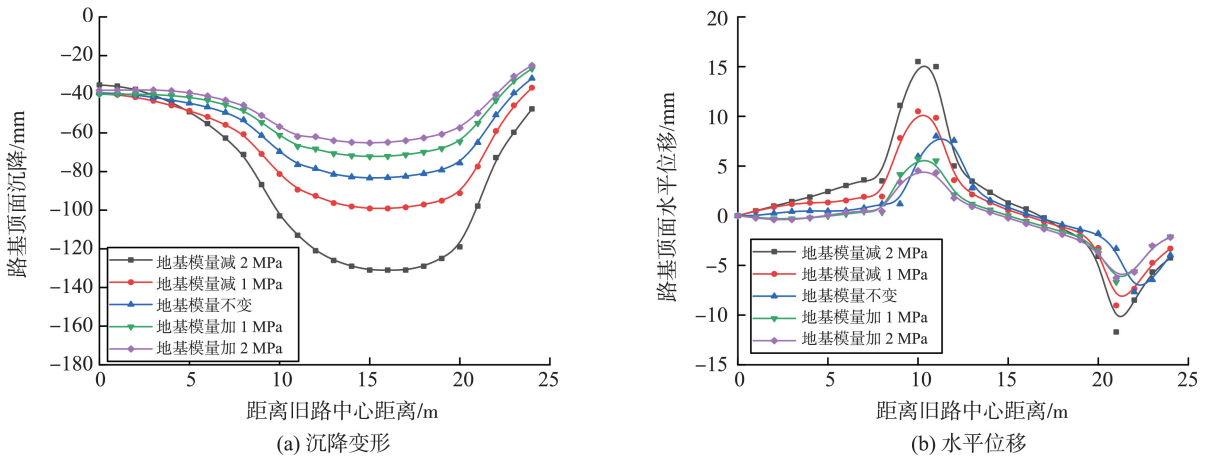


图 13 地基弹性模量引起的路基顶面变形规律

Fig.13 The deformation law of the top surface of the roadbed caused by the elastic modulus of the foundation

由图 12、13 可知:路基表面的竖向变形和旧路路基之间的最大差异沉降随地基弹性模量的提高而变小。地基模量分别减少 2 MPa、减少 1 MPa、增加 1 MPa 和 2 MPa 时,路基顶面的最大沉降分别为 13.1、9.91、7.23、6.52 cm,与地基弹性模量不变时进行相比,沉降增幅为 57.451 9%、19.110 6%、-13.101 0%、-21.634 6%。新旧路基最大差异沉降分别为 9.58、5.92、3.23、2.72 cm,与地基弹性模量不变时进行对比,最大差异沉降增幅为 118.22%、34.851 9%、-26.423 7%、38.041 0%。路基层表面的水平变形与地基土弹性模量间为负相关的变化关

系,且地基弹性模量的变化对路基层表面的水平位移影响较大。

2.2.4 地下水位对新旧路基差异沉降的影响

本次改扩建项目位于湿陷性黄土地区,此种黄土对水位的存在极为敏感,黄土遇水后模量变化极为明显,因此有必要对不同高度的地下水位进行模拟分析,研究地下水位的变化对路基及地基的变形特性的作用规律。为了研究不同高度下地下水位对路基变形的影响,选择对比地下水位分别为 0、1、2、4、5 m,不同地下水位时路基变形规律如图 14、15 所示。

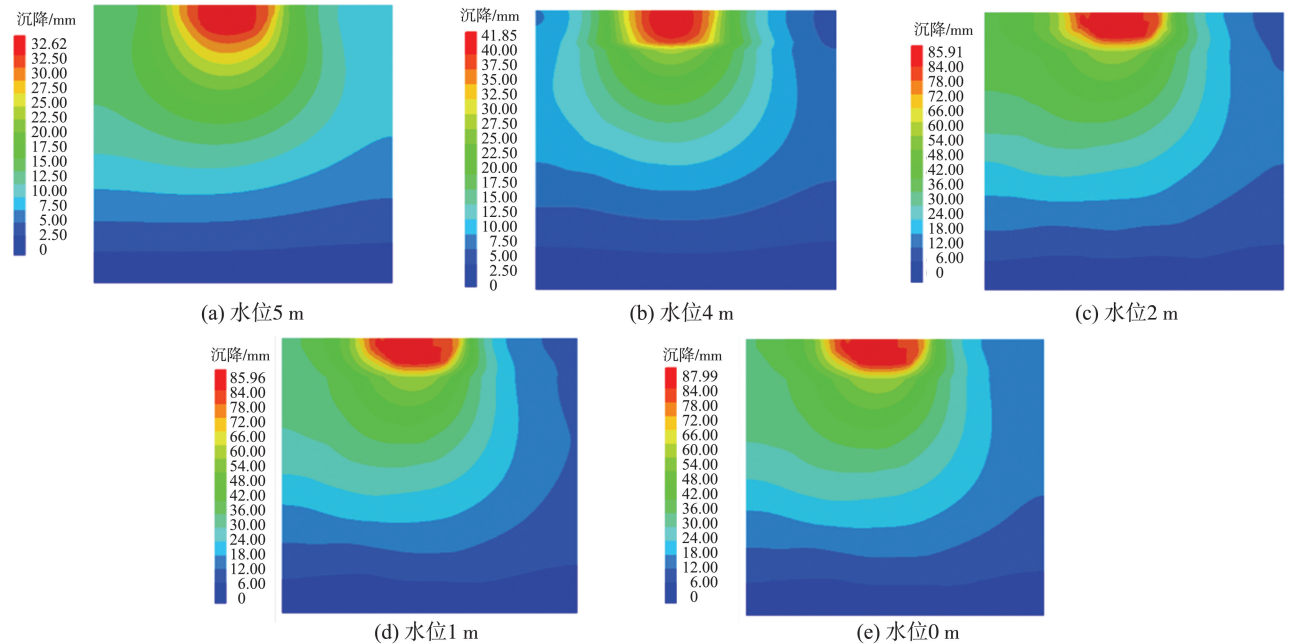


图 14 地下水位引起的路基沉降云图

Fig.14 Cloud map of roadbed settlement caused by groundwater level

由图 14、15 可知,路基表面的竖向变形和旧路路基之间的最大差异沉降随地下水位的升高而升高。地下水位在原始水位的基础上分别为 0、1、2、4、5 m 时,路基顶面的最大沉降分别为 3.31、

4.19、8.41、8.48、8.69 cm,相对于地下水位为 0 时,沉降降幅为 -60.642 1%、-50.178 4%、0.832 3%、3.329 4%。由于路堑开挖路基为地下 3 m,地下水位为 3 m 以上时,路堑开挖需要排水施工,新路基

填筑完成以后水位上升会引起新路基沉降;而地下水位为3 m以下时,不需要排水施工,新路基不会受到地下水影响,产生的沉降减少。新旧路基最大差异沉降分别为1.70、3.42、4.35、5.15、4.99 cm,与地下水位不变时进行对比,最大差异沉降增幅为-60.919 5%、-20.379 3%、18.390 8%、

14.712 6%。由于新旧路基最大差异沉降随地下水位升高而增大,但深1 m的旧路基受水位影响较小,所以地下水位在0 m时产生的新旧路基最大差异沉降较地下水位在1 m时有所减小,但仍大于地下水位在2 m时产生的新旧路基最大差异沉降。

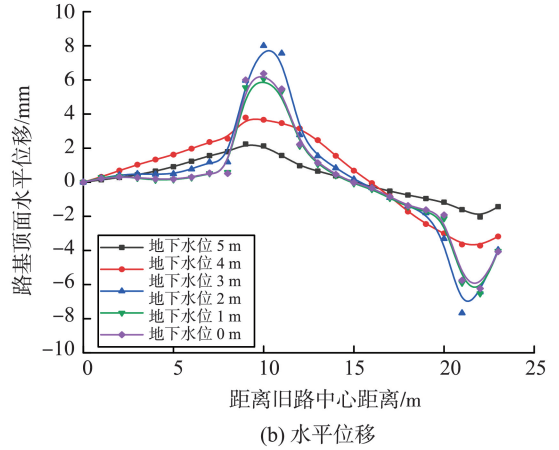
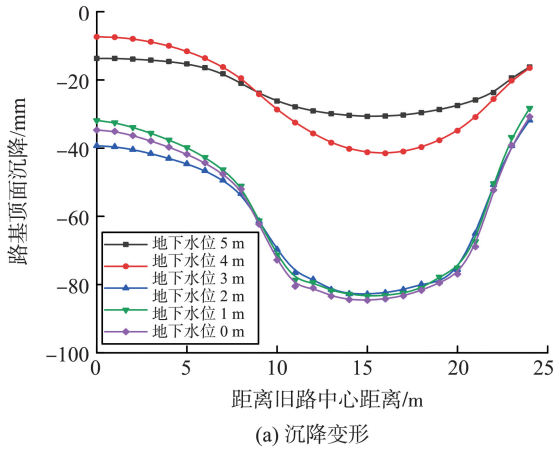


图15 地下水位引起的路基顶面变形规律

Fig.15 Deformation law of roadbed top surface caused by groundwater level

由图16可以看出,地基层的沉降受地下水位的变化影响较大,沉降与地下水位呈负相关。地下水位在原始水位的基础上分别减少3 m、减少2 m、不变、增加1 m和增加2 m时,地基层的最大沉降分别为3.07、4.15、8.28、8.34、8.46 cm,与地下水位不变时进行对比,沉降增幅为-62.922 7%、-49.879 2%、0.724 6%、2.173 9%,这表明地下水位变化对地基施工期和道路通车后的沉降影响较大。路基层表面的水平变形与水位高度间为正相关,且水位变化对路基层表面的水平向位移值影响较小。

3 结论

依托朔州市南环路黄土路基改扩建工程,基于电镜扫描试验和PFC3D颗粒流模拟分析,微观研究孔隙率的差异性导致湿陷性黄土微观结构特征及其应力变化规律。采用FLAC3D宏观数值计算方法,建立湿陷性黄土公路路基施工力学三维模型,宏观研究公路改扩建工程湿陷性黄土路基沉降规律,探讨路基参数对新老路基不均匀沉降变形的影响效应。主要得出以下结论。

(1) 原状黄土试样的颗粒粒径大多为30 μm 左右,较大的颗粒可达到80 μm ,多为散粒和凝块两种颗粒结构形态。湿陷性黄土骨架颗粒间的接触

关系主要有三种,即支架接触、镶嵌接触和分散分布。支架接触结构受质量含水率影响最大,随着含水率的增加,支架接触结构中的水敏性胶结物遇水,薄膜水使黏土矿物等膨胀聚集,颗粒间的胶结作用减弱,黏结强度减小,结构的稳定性受到破坏,土骨架被压缩,土颗粒形态表现为絮凝状。

(2) 在不同围压条件下,不同孔隙率的湿陷性黄土试样在加载过程中经历了4个发展阶段:孔裂隙压密阶段、弹性变形阶段、变形局部化阶段和应变软化阶段;与此同时,模型试样孔隙率在一定范围内变化将显著影响黄土峰值剪切强度以及剩余强度。

(3) 新老路基最大差异沉降和沉降都受路基加宽宽度和路堑挖深高度影响,且保持同增同减的关系;地基强度越高则新老路基不均匀沉降变形越小,也是新老路基不均匀沉降变形明显的主要因素。

(4) 地下水位越高,黄土的湿陷性越明显,新老路基不均匀沉降越大,为了减小路基变形,应对黄土地基进行改良处理并做好排水设计。

参考文献:

- [1] 王志超. 交通荷载下高速公路路基拓宽差异沉降研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2019.
WANG Zhichao. Research on differential settlement of expressway roadbed widening under traffic load[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.

- [2] 李巍. 基于FLAC^{3D}的拓宽路基变形数值分析[D]. 长沙:长沙理工大学, 2014.
LI Wei. Numerical analysis of widening roadbed deformation based on FLAC^{3D} [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [3] 方元伟. 滨莱高速公路改扩建工程路基稳定性及控制技术[D]. 西安:长安大学, 2019.
FANG Yuanwei. Research on stability and control technology of roadbed in the reconstruction and expansion project of binlai expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [4] 叶万军. 城市黄土路基灾变机制研究现状及展望[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(4):572.
YE Wanjun. Current status and prospects of research on disaster mechanism of urban loess roadbed[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(4):572.
- [5] ZHEN Yao, LIU Bailai. Experimental study on subgrade performance of collapsible loess mixed with concrete gravel[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 781(2):1-6.
- [6] 韩若楠. 高速公路改扩建分部填筑路基差异沉降特性及处治技术研究[D]. 济南:山东大学, 2021.
HAN Ruonan. Research on differential settlement characteristics and treatment techniques of roadbed filling in expressway reconstruction and expansion sections[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [7] JIA Yajun, CHEN Cunli, ZHANG Dengfei. Experimental study on deformation characteristics of collapsible loess under isotropic stress[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2020, 27(14):1278-1288.
- [8] 钟秀梅, 王谦, 刘钊钊, 等. 干湿循环作用下粉煤灰改良黄土路基的动强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊1):95-99.
ZHONG Xiumei, WANG Qian, LIU Zhaozhao, et al. Experimental study on dynamic strength of fly ash modified loess roadbed under dry wet cycling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Suppl.1):95-99.
- [9] MA Xuening, ZHANG Zheng, ZHANG Peiyun, et al. Study on the long-term dynamic stability of improved loess subgrade for high-speed railway[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2019, 173(3):217-227.
- [10] 张溯. 延安北过境线路基拓宽差异沉降特性及控制标准研究[D]. 西安:长安大学, 2019.
ZHANG Su. Research on differential settlement characteristics and control standards of yan'an north transit line foundation widening[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- [11] GIOMI Gnacio, FRANCISCA Franco M. Numerical modeling of the oedometrical behavior of collapsible loess[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022, 40(5):1-12.
- [12] 毕美乐. 基于粒观尺度的黄土湿陷机理研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
BI Meile. Research on the mechanism of loess collapse based on grain scale[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [13] 罗浩, 伍法权, 常金源, 等. 马兰黄土孔隙结构特征: 以赵家岸地区黄土为例[J]. 工程地质学报, 2021, 29(5):1366-1372.
LUO Hao, WU Faquan, CHANG Jinyuan, et al. Pore structure characteristics of malan loess; a case study of loess in Zhaojiaan Area[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5):1366-1372.
- [14] 井彦林, 李洁茹, 张志权, 等. 陕西渭北黄土浸水饱和前后孔隙变化规律[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10):160-163.
JING Yanlin, LI Jieru, ZHANG Zhiquan, et al. The pore changes of weibe loess in shaanxi before and after saturation with water[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(10):160-163.
- [15] 李凡, 樊康佳, 刘博诗. 人工制备湿陷性黄土微观结构探究[J]. 居舍, 2020,30:26-27.
LI Fan, FAN Kangjia, LIU Boshi. Study on the microstructure of artificially prepared collapsible loess[J]. Housing, 2020, 30:26-27.
- [16] 陶春亮. 基于CT技术的不同状态黄土孔隙特征试验研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
TAO Chunliang. Experimental study on pore characteristics of loess in different states based on CT technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.

(编辑:陈丽萍)