

DOI: 10. 7672/sgjs2025070112

高速公路拼宽路基差异沉降特性及工程应用分析^{*}

陈磊,贺亮,魏李,韩统领,侯长军
(中交三航局第九工程有限公司,重庆 400012)

[摘要] 为优化拼宽路基施工工艺,减小新旧路基差异化沉降,依托长修高速公路拼宽路基工程项目,利用 FLAC3D 有限差分数值模拟软件建立拼宽路基数值仿真分析模型,揭示高速公路拼宽路基在施工和运营过程中的路基路面沉降规律,并通过改变老路基开挖台阶数量、宽度和新路基的坡面放坡坡度等参数,构建不同的拼宽路基施工工况,分析不同影响因素对高速公路拼宽路基差异化沉降的影响,数值模拟结果与现场监测结果拟合较好,验证了数值模型的可靠性。旨在优化拼宽路基设计施工参数,提高工程质量和使用寿命。

[关键词] 高速公路;路基;差异化沉降;数值模拟;监测

[中图分类号] U416. 1+11

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0112-06

Analysis of Differential Settlement and Engineering Application of Expressway Widened Subgrade

CHEN Lei, HE Liang, WEI Li, HAN Tongling, HOU Changjun

(CCCC Third Harbor Bureau Ninth Engineering Co., Ltd., Chongqing 400012, China)

Abstract: To optimize the construction technology of widened subgrade and reduce the differential settlement of new and old subgrade, based on the widened subgrade project of Changyuan-Xiuwu Expressway, the numerical simulation analysis model of widened subgrade is established by using FLAC3D finite difference numerical simulation software to reveal the settlement law of subgrade and pavement during the construction and operation of widened subgrade of expressway. By changing the number and width of excavation steps of the old subgrade and the slope gradient of the new subgrade, different construction conditions of the widened subgrade were constructed, and the influence of different factors on the differential settlement of the widened subgrade of the expressway was analyzed. The numerical simulation results are in good agreement with the field monitoring results. The reliability of the numerical model has been verified. The aim of the study is to optimize the design and construction parameters of the widened roadbed and improve the quality and service life of the project.

Keywords: expressway; subgrade; differential settlement; simulation; monitoring

0 引言

随着我国高速公路主干网络趋于成型,对于新建高速公路的需求逐步降低,但随着人民生活水平提高,交通工具数量大幅增长,现有的高速公路出现了交通量饱和、通行能力不足等问题,因此对现有高速公路进行扩容,提高主要高速公路干线的通行能力迫在眉睫^[1]。

路基拓展拼宽是目前常用的公路扩容改造方式,具有平纵面与老路协调、可充分利用已征用土

地、互通服务设施的优点,目前已被广泛运用到道路特别是高速公路的扩容改造工程中^[2]。目前高速公路拼宽技术的理论研究落后于工程应用,虽然国内外专家和学者结合实际高速公路加宽工程,开展了大量研究工作^[3-6],但影响新老路基差异性沉降的因素较多,加之我国工程地质条件复杂多变,因此需要对道路拼宽施工技术开展进一步研究。

本文利用 FLAC3D 建立拼宽路基数值分析模型,揭示高速公路拼宽路基在施工和运营过程中的路基路面沉降规律,并通过改变老路基开挖台阶数量、宽度和新路基的坡面放坡坡度等参数,研究拼宽路基差异化沉降与设计施工参数之间的关系。

^{*} 河南省科技计划(202102310939)

[作者简介] 陈磊,高级工程师,硕士, E-mail: 357323853@qq.com

[收稿日期] 2024-10-20

根据数值仿真分析结果,可以对拼宽路基设计施工参数进行优化,提出相应的差异沉降控制方法,为设计施工提供参考。

1 拼宽路基工程概况和数值建模

长垣至修武高速公路项目的终点在修武县郇封镇万箱铺村西侧 K133+258.036 处,与荷宝高速相交,荷宝高速为现状双向四车道高速公路,设计时速 120km/h,路基宽 28m。荷宝高速目前已列入河南省改扩建计划,远期改建为双向 8 车道,长修高速与荷宝高速节点位置段拟定改建方案为双侧拼宽,改建后路基宽度 41m,本标段内有多段高速公路路基需要进行拼宽,因此本文依托该工程开展研究。

根据工程需要和规范要求,路基初始宽度 28m,每侧加宽 6.5m,拼宽后路基总宽度为 41m。通过 FLAC3D 有限差分数值模拟软件进行拼宽路基建模时,为了保证模型边界不影响计算效果,地基基底长×高=100m×20m,划分网格总单元数 49 650 个,数值模型的路基拼宽部分如图 1 所示。

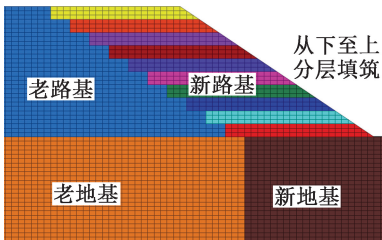


图 1 拼宽路基模型
Fig.1 Widened subgrade model

在拼宽路基模型中,新老路基和地基均采用实体单元建模,土体采用弹塑性本构模型,服从莫尔-库伦屈服准则。各部分岩土体的具体物理力学参数如表 1 所示。

表 1 拼宽路基岩土体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock and soil mass of the widened subgrade					
类型	密度/ (g·cm ⁻³)	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比
老路基	2.18	40.0	22.5	31.5	0.29
新路基	2.09	33.5	18.4	25.3	0.28
老地基	2.06	19.8	36.6	15.6	0.25
新地基	1.98	8.7	16.8	12.6	0.25

拼宽路基模型的初始设计施工指标如下:老路基开挖台阶的数量为 6 个,台阶高度和宽度分别为 1.0m 和 1.5m,新路基的坡面放坡角度为 1:1.5。以该方案作为典型工况进行计算分析,阐释拼宽路基路面在施工和运营过程中具有的普遍性沉降

规律。

为分析研究不同的设计施工参数对拼宽路基沉降分布和变化规律的影响,本文参考设计规范和工程实际,选取了老路基开挖台阶的数量和宽度以及新路基坡面的坡度等影响因素,设计了多种数值模拟工况。

2 拼宽路基典型工况数值分析

2.1 施工过程

在模拟拼宽路基施工过程中,共分 6 轮自下而上进行开挖填筑,每层拼宽路基填筑后,需待沉降稳定再继续填筑下一层。根据 JTG/T 3610—2019《公路路基施工技术规范》要求,所有工况中清除拼宽部分新地基原有地表土的厚度均为 0.3m,清除老路基坡面土的法向厚度均为 0.3m。挖除新地基和老路基均采用 FLAC3D 中的 null 单元。拼宽路基竖向位移云图如图 2 所示。

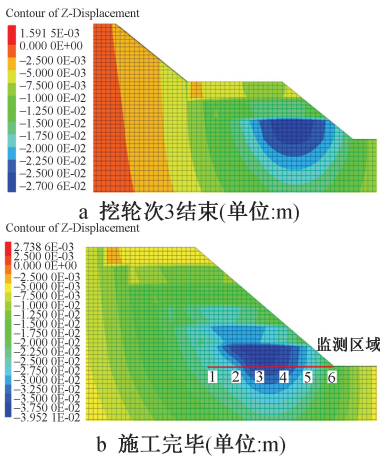


图 2 拼宽路基竖向位移云图

Fig.2 Cloud map of vertical displacement of the widened subgrade

由图 2a 可知,在拼宽路基施工过程中,每层新路基填筑完成后,上一轮挖填的路基中均出现明显的沉降现象。由图 2b 可知,在拼宽路基施工完成后,竖向位移最大值出现在拼宽路基底面,因此选取拼宽路基与下伏地基的接触面等间距布设 6 个监测点监测并分析每轮挖填工程稳定后拼宽路基的竖向位移。

拼宽路基竖向位移分布变化曲线如图 3 所示,拼宽路基底部的竖向位移整体呈现“中间大,两侧小”的分布规律。当第 1 轮挖填施工沉降稳定后,竖向位移最大值为 11.63mm,位于监测点 4,位于新路基坡脚位置的监测点 6 竖向位移为 7.19mm,位于新老路基交界处的监测点 1 竖向位移仅有 2.98mm,此时新路基的整体沉降倾向坡脚位置。但

随着挖填轮次的增加,新路基的沉降逐渐向老路基方向靠拢,最大沉降点由点 4 移动至点 3,新老路基交界处的沉降快速增大,施工完毕时点 1 的沉降位移共增长 24.21mm,同一时段内点 6 的沉降位移仅增长 11.53mm。为了控制路基的不均匀沉降,在处理拼宽路基的地基时,应重点强化靠近交界一侧的地基。

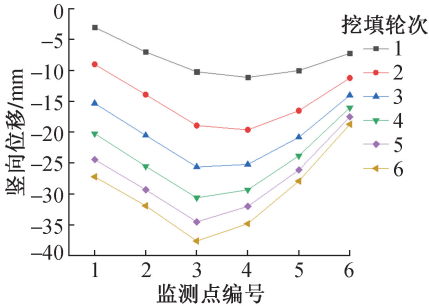


图 3 拼宽路基地基竖向位移分布变化曲线

Fig. 3 Vertical displacement distribution curve of the widened subgrade foundation varies

由图 3 可知,第 1 轮施工结束后,拼宽路基地面的最大竖向位移为 11.63mm,第 2~6 轮施工结束后,最大竖向位移依次增长了 8.72, 6.68, 4.97, 3.89, 3.06mm,说明随着上部填筑工作的持续进行,在上部路基重力和夯实力的作用下,新路基底部的竖向沉降已经逐渐趋于稳定。

拼宽路基剪应变云图如图 4 所示,在拼宽路基施工过程中,剪切变形集中分布在新路基各轮次填筑的施工面和新老路基的交界处,其中以新路基坡脚位置和坡顶的新老路基交界位置最为明显。拼宽路基容易沿这些界面形成潜在滑移面。

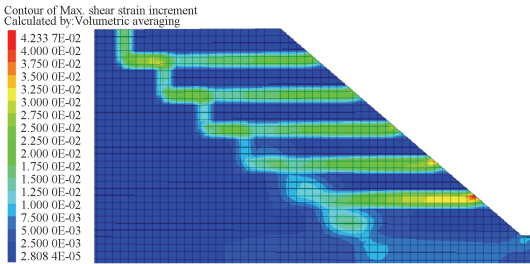


图 4 拼宽路基剪应变云图(施工完毕)

Fig. 4 Cloud map of shear strain of widened subgrade(construction completed)

2.2 道路运行

为了分析拼宽路基在运营过程中的沉降变形规律,根据规范要求要求在拼宽路面上均匀布设 10kPa 的车辆荷载,并逐渐增大。拼宽路面竖向位移分布随均布荷载变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,当均布荷载为 10kPa 时,最大位移

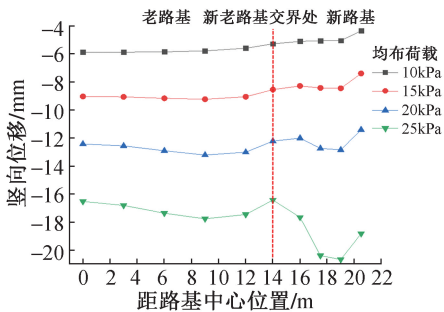


图 5 拼宽路面竖向位移分布随均布荷载变化曲线

Fig. 5 Vertical displacement distribution of widened subgrade varies with the uniform load

位于路面中心点处,路面竖向位移从中心点向路肩逐渐减小,新老路基整体沉降较为均匀;当均布荷载增大到 15kPa 时,路面最大位移点由路面中心移动至距中心 9m 处,新老路基交界处的竖向位移小于两侧路面,拼宽路面开始出现差异化沉降;当均布荷载增大到 20kPa 时,以新老路基交界面为中心,拼宽路面沉降位移开始呈现出“两侧大,中间小”的分布规律,即交界面两侧各有一个持续增大的竖向位移峰值点,交界面附近沉降位移增长较慢,差异化沉降加剧。

随着路面均布荷载进一步增大至 25kPa,新路面的竖向位移峰值迅速增大并超过老路面(见图 6)。由图 6 可知,此时新路基沿新老路基交界面开始出现明显滑移,新路基上部的竖向位移迅速增大。如果荷载进一步增大或者遭遇极端气候影响,拼宽新老路面的差异化沉降会进一步增大,最终造成拼宽路基失效。

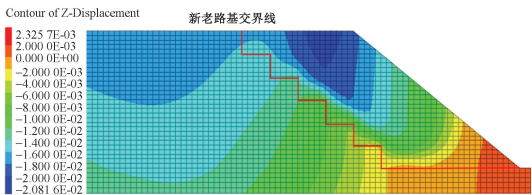


图 6 拼宽路基竖向位移云图(均布荷载 25kPa)

Fig. 6 Cloud map of vertical displacement of widened subgrade (uniform load 25kPa)

3 拼宽路基影响因素数值分析

3.1 老路基台阶数量

根据规范要求,进行拼宽路基施工时,老路基的台阶高度不宜大于 1.0m,台阶宽度不宜小于 1.0m,因此保持其他参数不变,设计以下 3 种工况,以研究老路基开挖台阶数量影响(见表 2)。

根据对比分析发现,不同台阶数量的拼宽路基在施工完毕时,路基地面的沉降位移峰值和分布规

表 2 老路基台阶数量工况

Table 2 Working condition of old subgrade step number

工况	1	2	3
台阶宽度/m	1.50	1.25	1.00
台阶高度/m	1.00	0.75	0.60
台阶数量	6	8	10

律基本相同,说明仅改变台阶数量对施工过程的影响很小。当拼宽道路进入运营过程时,在 3 种工况下的拼宽路面上布设 20kPa 的均布荷载,计算结果如图 7 所示。

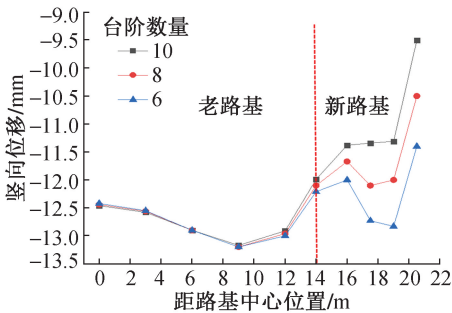


图 7 拼宽路面竖向位移分布随台阶数量变化曲线

Fig. 7 Vertical displacement distribution of the widened pavement varies with the step number

由图 7 可知,增加开挖台阶的数量对老路基的路面竖向位移分布规律影响很小,但新路基侧的路面位移随着台阶数量的减小逐渐增大,工况 1~2 的路面竖向位移沿新老路基分界面呈现出明显的“两侧大,中间小”的分布规律,说明减少开挖台阶数量会增大拼宽道路运营过程中的差异化沉降。

3.2 老路基台阶宽度

如表 3 所示,保持其他参数不变,根据规范设计以下 3 种工况,以研究老路基开挖台阶宽度对拼宽路基差异化沉降的影响(见图 8)。

表 3 老路基台阶宽度工况

Table 3 Working conditions of old subgrade step width

工况	1	4	5
台阶宽度/m	1.50	1.75	2.00
台阶高度/m	1.0	1.0	1.0
台阶数量	6	6	6

由图 8 可知,在 3 种工况的拼宽路面上布设 10kPa 的均布荷载时,老路基的竖向位移分布规律和大小基本相同,但工况 4 和 5 的新路面上的位移分布与典型工况有明显区别,竖向位移峰值随着台阶宽度的增大迅速增长,位移峰值出现在坡肩位置。

拼宽路基剪应变云图如图 9 所示。对比图 9 和图 4 可知,随着台阶宽度的增大,新老路基交界面的坡角逐渐减小,与近似水平的填筑路基工作面之间

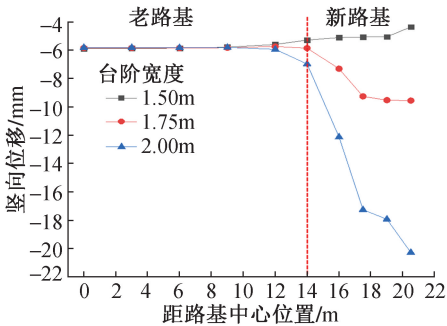


图 8 拼宽路面竖向位移分布随台阶宽度变化曲线

Fig. 8 Vertical displacement distribution of the widened pavement varies with the step width

的夹角减小,剪应变集中在两者间的交界处,因此更容易形成潜在滑移面,导致拼宽路基沿交界面发生滑坡。

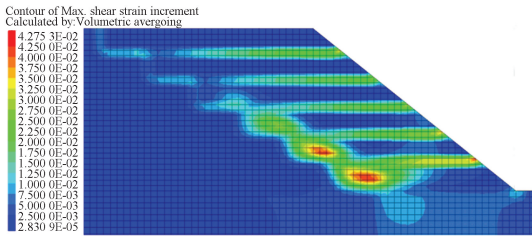


图 9 拼宽路基剪应变云图(工况 5 施工完毕)

Fig. 9 Shear strain cloud map of widened subgrade (condition 5 construction completed)

3.3 新路基坡面放坡角度

如表 4 所示,保持拼宽路面总宽度(41m)不变,根据规范设计以下 3 种工况,通过增减拼宽新路基坡面的放坡角度,研究其对拼宽路基差异化沉降的影响。

表 4 新路基坡面放坡角工况

Table 4 Working conditions of new subgrade slope angle

工况	1	6	7
坡角(高宽比)	1:1.5	1:1.25	1:1.75

为了监测对比新路基底面的沉降规律,与典型工况相同,将新老路基交界点和新路基坡脚两个位置的监测点分别设为 1 号和 6 号,中间平均布设 4 个监测点。拼宽地基竖向位移分布随放坡角度变化曲线如图 10 所示。

由图 10 可知,拼宽路基施工完毕时,不同放坡角度的路基地面位移分布规律均为“中间大,两侧小”,3 种工况下坡脚位置点 6 的竖向位移基本相同,其余位置的位移均随着放坡角度的变缓而逐渐增大。其中坡度最缓的工况 7 相对于工况 1 和工况 6,最大竖向位移分别增大了 18.7% 和 44.5%。随着坡度变缓,每个工况的 6 个监测点之间的最大和

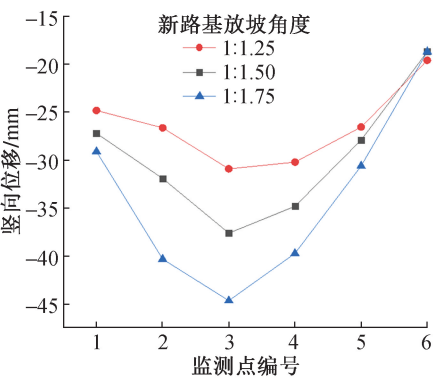


图 10 拼宽地基竖向位移分布随放坡角度变化曲线

Fig. 10 Vertical displacement distribution of the widened foundation varies with the slope angle

最小位移差值依次为 11.29,18.90,25.92mm。说明在规范范围内减小新路基的放坡角度,可以有效降低路基底面的竖向位移峰值和不均匀沉降。

为对比不同放坡角度的拼宽路面在运营过程中的沉降位移分布变化规律,分别在 3 种工况的拼宽路面上布设 10kPa 和 20kPa 的均布荷载,计算结果如图 11 所示。

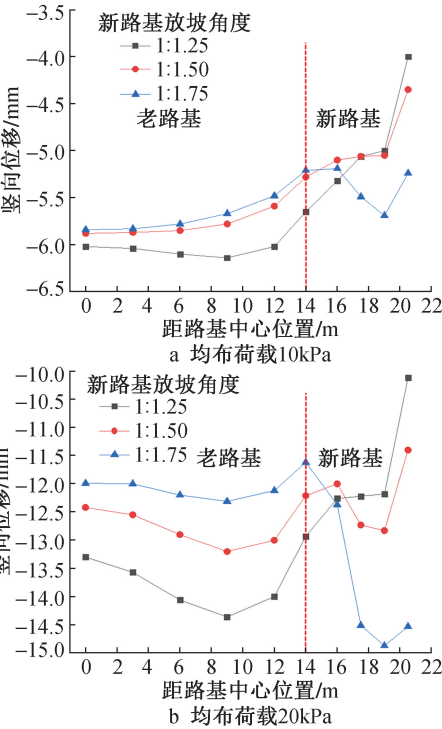


图 11 拼宽路面竖向位移分布随放坡角度变化曲线

Fig. 11 Vertical displacement distribution of the widened pavement varies with the slope angle

由图 11a 可知,当均布荷载为 10kPa 时,拼宽路面的竖向位移峰值随放坡角度的增大而逐渐减小,但此时工况 1 和工况 6 的路面竖向位移均从中心点向路肩逐渐减小,而工况 7 的路面竖向位移已沿新

老路基分界面呈现出明显的“两侧大,中间小”的分布规律。随着均布荷载增大至 20kPa,图 11b 中 3 种工况的路面竖向位移均沿分界面呈现“两侧大,中间小”的分布规律。老路基的竖向位移峰值仍然随放坡角度的增大而逐渐减小,但新路基的竖向位移峰值随放坡角度的增大而逐渐增大,其中工况 7 的老路基竖向位移峰值最小,新路基的竖向位移峰值最大,且向坡肩位置移动,新老路基沿分界线呈现出的差异化沉降最为明显。

3.4 施工期间拼宽地基位移对比分析

团队根据数值分析结果对施工设计方案和施工流程进行了优化。为了保证拼宽路基施工的安全性,同时验证数值模型的可靠性,施工期间在新老路基交界线坡顶(监测点 1)和新路基坡脚(监测点 2)两个位置布设了竖向位移监测点,并将监测结果和数值模拟结果进行了对比分析,如图 12 所示。

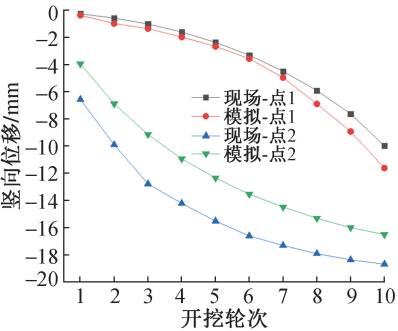


图 12 拼宽路基现场监测与数值模拟竖向位移对比曲线

Fig. 12 Vertical displacement comparison curve of the widened foundation between field monitoring and numerical simulation

由图 12 可知,由现场监测和数值模拟得到的两个监测点竖向位移随开挖轮次的变化规律均相似,其中点 1 两条位移曲线的增幅均逐渐增大,点 2 两条位移曲线的增幅均逐渐减小。点 1 和点 2 的现场监测和数值模拟最终竖向位移分别相差 14.1%和 11.6%,误差较小,其中现场监测结果均大于数值模拟,根据分析是由于施工机械和人员作业过程中施加的应力造成的影响,在后续模拟中需要考虑。该对比结果验证了拼宽路基数值模型的可靠性,可以为后续道路运营期间优化数值分析模型提供重要参考。

4 结语

大量工程实践发现,高速公路拼宽工程设计难度大,施工工艺复杂,老路基经过长期荷载作用,必然和新路基在地基固结程度和路基刚度上存在差异,进而引起不均匀沉降和滑坡。本文依托实际工

程,利用FLAC3D数值模拟软件,揭示了拼宽路基路面在施工和运营过程中的竖向位移分布和变化规律以及拼宽路基设计施工参数对其的影响,并与现场监测结果较好地拟合,为拼宽路基的设计施工提供了参考,主要结论如下。

1)拼宽路基在施工和运营的过程中,容易沿新老路基交界面和填筑新路基的工作面发生剪切变形,形成潜在滑动面,进而引发滑坡。

2)在上覆荷载的作用下,拼宽路面的位移峰值首先出现在路基中央,随着荷载的增大峰值逐渐向新老路基交界面移动,并沿交界面呈现“两侧大,中间小”的位移分布规律,出现差异化沉降。最后新路基侧的位移峰值快速上升,差异化沉降进一步扩大,拼宽路基失效。

3)增大老路基开挖台阶数量会导致新路基竖向位移增大,对老路基的影响可以忽略。

4)增大老路基开挖台阶宽度对老路基影响可以忽略,但新路基竖向位移迅速增大。因为新老路基交界面和新路基填筑工作面之间的夹角减小,更容易形成滑移面,增大滑坡风险。

5)增大新路基放坡角度,可以遏制老路基的竖向沉降,但会导致新路基施工期间的基底位移和运营期间的路面位移明显增大。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路基工程学术研究综述·2021

[J]. 中国公路学报,2021,34(3):1-49.
Editorial department of China journal of highway and transport.
Review on China's subgrade engineering research 2021 [J].
China journal of highway and transport, 2021, 34(3):1-49.
[2] 陈君朝, 杨广庆. 高速公路改扩建工程路基加宽施工技术 [M]. 北京:人民交通出版社,2014.
CHEN J C, YANG G Q. Construction technology of widening roadbed in expressway reconstruction and extension project[M]. Beijing: China Communication Press, 2014.
[3] 于建荣,程小强,李峰,等. 改扩建道路纵向加高拓宽路基沉降特性与影响因素研究[J]. 路基工程,2019(5):35-39.
YU J R, CHENG X Q, LI F, et al. Study on subgrade settlement characteristics and the influencing factors by lengthwise heightening and widening in road reconstruction and extension [J]. Subgrade engineering, 2019(5):35-39.
[4] 贾宝新,刘丰溥,赵良,等. 公路改扩建导致新老路基差异沉降的因素分析[J]. 安全与环境学报,2020,20(1):67-72.
JIA B X, LIU F P, ZHAO L, et al. Risk assessment of the settlement of peat soil field based on the extension cloud theory [J]. Journal of safety and environment, 2020,20(1):67-72.
[5] 宋玲. 高速公路双侧拼宽路基差异沉降影响因素分析[J]. 山西交通科技,2023(1):47-50.
SONG L. Analysis of influencing factors of differential settlement of two-sided widened subgrade of expressway[J]. Shanxi science & technology of transportation, 2023(1):47-50.
[6] A N G VAN MEURS, AVAN DEN BERG. Embankment widening with the gap-method [J]. Geotechnical engineering for transportation infrastructure, 1999:1133-1138.