

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231221001

文章编号: 1672-9331(2024)01-0110-23

引用格式: 莫娅婵, 张军辉, 杨豪, 等. 改扩建工程路基差异沉降研究综述[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2024, 21(1): 110-132.

Citation: MO Yachan, ZHANG Junhui, YANG Hao, et al. Review on differential settlement of subgrade in reconstruction and expansion projects [J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 110-132.

改扩建工程路基差异沉降研究综述

莫娅婵^{1,2}, 张军辉^{1,2}, 杨豪^{1,2}, 周梦绮^{1,2}

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 公路工程省部共建教育部重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:随着我国经济社会的快速发展及交通量的持续增长,早期建成的高速公路已经开始出现通行能力差、服务水平低等问题。为了解决这一问题,我国在近年来积极开展了高速公路的改扩建工作,目前已完成了多条高速公路的改扩建工程并投入运营,取得了显著成效。然而,高速公路的改扩建与新建公路有所不同,高速公路在改扩建过程中涉及新老路基拼接、变形协调等问题,特别是新老路基拼接引起的差异沉降,对路基路面结构危害巨大。为此,国内外学者致力于对减小新老路基差异沉降进行研究,探索了许多新的理念和技术。从差异沉降的理论、影响因素以及路基拼接处的处治措施3方面对现有研究成果进行了回顾和梳理,发现对减小新老路基差异沉降的措施,尤其是对加筋结构的布置、路基内部排水结构的研究还比较缺乏。建议开展此类研究,并从理论和影响因素上对差异沉降进行分析,提出适用于多种工况的拼接措施,从而起到控制差异沉降的作用,旨在为实际工程项目提供理论和实际指导。

关键词:路基工程;改扩建工程;差异沉降;变形协调;处治技术

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Review on differential settlement of subgrade in reconstruction and expansion projects

MO Yachan^{1,2}, ZHANG Junhui^{1,2}, YANG Hao^{1,2}, ZHOU Mengqi^{1,2}

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Key Laboratory of Highway Engineering of Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: With the rapid development of China's economy and society and the continuous growth of traffic volume, early built highways have begun to show poor traffic capacity and low service levels. In order to solve this problem, China has actively undertaken the reconstruction and expansion of expressways in recent years. At present, many expressway reconstruction and expansion projects have been completed and put into operation, and remarkable results have been achieved. However, the reconstruction and expansion of expressways is different from that of new highways. This process involves issues such as splicing new and old roadbeds and coordinating deformations. In particular, the differential settlement resulting from the splicing of new and old

收稿日期: 2023-12-21; 修回日期: 2024-02-02; 接受日期: 2024-02-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600900); 国家杰出青年科学基金项目(52025085); 国家自然科学基金项目(52208421); 湖南省自然科学基金项目(2023JJ40050); 湖南省教育厅科学研究项目(23B0315)

通信作者: 杨豪(1991—)(ORCID: 0000-0002-4204-7814), 男, 讲师, 主要从事道路与岩土工程方面的研究。

E-mail: hyang@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

roadbeds poses a significant threat to the roadbed and pavement structure. Therefore, scholars at home and abroad are committed to reducing the differential settlement of new and old roadbeds, and have explored many new ideas and technologies. This paper reviews and combs the existing research results from three aspects: the settlement theory of differential settlement, the influencing factors and the treatment measures of subgrade splicing. It is found that the measures to reduce the differential settlement of new and old subgrade, especially for the arrangement of reinforced structure, the research on the internal drainage structure of subgrade is still relatively lacking. Therefore, it is recommended to conduct further research in these areas, comprehensively understanding the mechanisms and influencing factors of differential settlement in subgrades, and proposing splicing measures suitable for diverse working conditions. This endeavor aims to provide theoretical and practical guidance for practical engineering projects.

Key words: subgrade engineering; reconstruction and expansion project; uneven settlement; synergistic deformation; treatment technology

Foundation item: Project (2021YFB2600900) supported by the National Key Research and Development Program of China; Project (52025085) supported by the National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China; Project (52208421) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2023JJ40050) supported by Hunan Provincial Natural Science Foundation; Project (23B0315) supported by Scientific Research Project of Education Department of Hunan Province

Corresponding author: YANG Hao (1991—) (ORCID: 0000-0002-4204-7814), male, lecturer, research interest: road and geotechnical engineering. E-mail: hyang@csust.edu.cn

0 引言

经过近40年的建设,截至目前我国高速公路网络骨架基本形成,通车总里程超过17万km,规模稳居世界第一。随着居民汽车保有量的增长,高速公路已经出现通行能力与服务水平不相匹配的问题,尤其是在一些车流量大的路段容易出现交通拥堵。为了适应需求,补齐短板,我国已加快高速公路的改扩建步伐,在“十三五”期间,完成审批或核准的国家高速公路改扩建项目已达70多个,总规模超过6 000 km。国务院在《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》中强调要优化综合运输通道布局,完善公路网结构功能,推进高速公路繁忙路段扩容改造等。可以说,我国高速公路改扩建需求巨大。图1所示为我国高速公路里程近些年的发展趋势。

高速公路的改扩建不同于普通的新建公路,高速公路在改扩建过程中还涉及新老路基拼接、排水、变形协调等问题。尤其是,由路基拼接引起的差异沉降容易在路面结构中产生附加应力,一旦这种附加应力与车辆荷载产生的应力之和超过路面材料本身的承受能力,路面就会产生结构性

破坏,进而引起路面的不均匀沉降、开裂,严重时甚至会发生路基路面整体坍塌,严重影响行车安全。为解决这一问题,国内外学者们致力于研究如何减小新老路基差异沉降,并探索了许多新的理念和技术。现阶段,国内公路的改扩建工程通常采取在老路堤边坡开挖台阶、加筋土路堤、对新路堤提出压实度要求、改良土高强路堤和轻质路堤等技术来解决新老路基的衔接问题。这些技术的应用能有效减小差异沉降对路面结构的影响,提高路基的整体稳定性,确保行车安全。

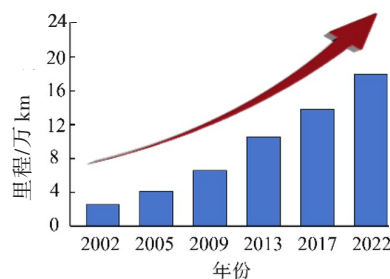


图1 我国高速公路里程发展趋势

Fig. 1 Development trend of highway mileage in China

本文总结了路基拼接差异沉降的相关理论和处治措施,详细阐述了差异沉降产生的基本原理、差异沉降的计算方法和已有的控制标准、路基变形规律等;同时,总结了多重因素(拓宽方式、拓宽

高度与宽度、新路基弹性模量、压实度等)影响下拼接路基的差异沉降规律,以及压实技术、台阶处治技术、路基土加筋技术和填料处治技术、防排水综合处治技术等措施对差异沉降的控制效果;提出了改扩建工程未来可能的研究方向,即不仅需要进一步深入研究拼接路基差异沉降的产生机理和规律,还需要探索新的处治措施和技术。这些研究成果对于工程设计和施工具有积极意义,能够为减小拼接路基差异沉降、维持拼接路基的稳定提供科学依据。

1 路基拼接差异沉降理论分析

高速公路在改扩建过程中产生差异沉降是很普遍的现象。差异沉降是指在改扩建过程中,由于受到施工、行车荷载、环境因素的影响,新老路基产生了不同程度的沉降。为了减小差异沉降,首先需要了解路基差异沉降产生的原理。

1.1 路基拼接差异沉降基本原理

路基所受到的自重和外部荷载使路基及地基中的应力状态发生了变化。在附加应力的作用下,土体发生竖向、侧向以及剪切变形。从土体的变形机理角度,可将路基的不均匀沉降分为三部分(图2):瞬时沉降(S_d)、主固结沉降(S_c)和次固结沉降(S_s)。其中,瞬时沉降(S_d)是在路基填筑过程中立刻发生的沉降,此时土体水分尚未排出,土体仅发生形状改变;主固结沉降(S_c)是在路基施工过程中,由于路基自重及压实器械的作用,土中孔隙水逐渐被挤出,孔隙体积相应减小而发生的沉降,它随着时间的延长而增大;次固结沉降(S_s)是在土体中的超孔隙水压力完全消散后,在有效应力保持不变的前提下,由土壤的固体骨架经历长时间的缓慢蠕变和重新排列导致的。从图2可以看出,主固结沉降(S_c)是总沉降的主要组成部分。

有学者从不同角度对新老路基差异沉降的基

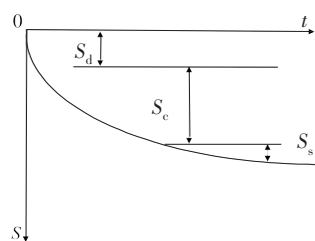


图2 拼接路基总沉降示意图

Fig. 2 Total settlement diagram of splicing subgrade

本原理做出了诠释。翁效林等^[1]认为地基的压缩固结将产生差异沉降,且路堤自身压缩变形和土基塑性累积变形的不均匀性,必将使路基表层出现差异沉降。孟庆新^[2]将土体受力后出现的变形分为体积变形和形状变形,在瞬时沉降阶段路基只发生形变而没有体变,而在主固结与次固结沉降阶段均有体变发生。唐炫^[3]将路基沉降的原因分为内因和外因,从内因上讲,路基沉降往往是土层孔隙出现了压缩变形,从而引起路基在竖直方向上出现变形;从外因上讲,路基沉降是路基作为外荷载作用在地基上,从而使地基中原有的应力状态发生了变化。新老路基的填筑时间相隔较长,新老路基固结程度差异较大,因而新老路基产生了差异沉降。石海丽^[4]认为除了路基作为外荷载加载在地基上,还有一个重要的因素是车辆荷载,随着车辆荷载作用位置的不同,新老路基的有效应力增加值也有所不同,导致产生的变形量不同而出现差异沉降。陈民勇等^[5]研究了新老路基的施工时间差异对路基变形造成的影响,重点分析了在修筑阶段及运营阶段拓宽路基的应力和孔压的变化。在新路运营初期,孔隙水压力和有效应力会同时增大。随着道路的运营,总应力不变,孔隙水压力逐渐消散直至趋于稳定,有效应力逐渐增大。对于老路基中心线下面的地基,由于距离新路较远,垂直总应力未受到影响。在靠近老路基边缘,土体总应力增大,孔隙水压力和有效应力也同时增大。之后,随着荷载的稳定,孔隙水压力逐渐消散,有效应力逐渐增大,路基发生压缩变形,并产生沉降。

差异沉降由地基沉降和路基沉降两部分组成。首先,老路基经过多年运行,沉降趋于稳定,而新老路基作为外荷载加在地基上,地基的应力出现重分布,导致新老路基随着地基一起发生不均匀沉降;其次,新老路基在填料、含水率、压实度等方面存在明显差异,在施工完成后,受到车辆荷载和土体的次固结作用,土层孔隙发生压缩变形,孔隙水被排出,导致路基出现不均匀沉降。

1.2 路基拼接变形规律

1.2.1 沉降变形规律

老路基经过多年的运行和固结沉降,主固结沉降基本完成,地基沉降趋于稳定,此时,地基和老路基沉降曲线形态呈U形,沉降值在道路中心线处最大,在远离道路中心线一定距离处,路堤荷

载和行车荷载对沉降影响较小。在加宽路基的荷载作用下,地基和路基沉降曲线形态由U形变为最终的W形,沉降值在道路中心线之下最小,新路堤形心之下最大,呈“马鞍形”分布^[6],如图3所示。

国内外学者通过有限元仿真模拟、模型试验、离心试验及现场监测来验证路基的沉降规律。张军辉等^[7]采用横剖管来监测路基沉降,运用ABAQUS软件建立扩建路堤模型,提取模拟沉降数据,并与现场监测数据进行对比,发现越靠近新路基路中线,沉降量越大,最大沉降量发生在新路基断面形心垂直位置处。路基沉降量中间大、两边小,呈“碗盆”状,并验证了数值模型的有效性。贾亮等^[8]分别在行车道和路肩位置布置单点沉降计,发现路肩位置的沉降大于行车道位置的沉降,且路基沉降随时间的增加而增大,在高填方路堤填筑结束1年后沉降趋于稳定,在汽车荷载作用下路堤沉降未出现较明显的增长趋势。葛苗苗等^[9]通过结合FEM数值计算与分层迭代反演方法来预测高填方的工后沉降,结果表明,由高填方路基引起的沉降约占总沉降的63%,原有地基沉降约占37%。

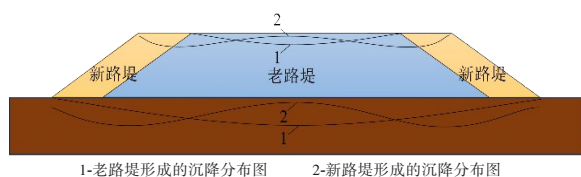


图3 路基拼接沉降变形规律

Fig. 3 Subgrade splicing settlement deformation law

1.2.2 水平变形规律

路基加宽后,地基水平位移最大值位于地基下一定深度处。对于老路基坡脚处地基的水平位移,其先往内侧移动,一定深度后,其移动方向转为向外,但向外的移动距离较小;对于新路基坡脚处地基,其水平位移的方向均为向外,如图4所示。蒋鑫等^[10]基于有限元数值模拟,研究了软土地基高速公路路基拓宽改建全过程的变形特性,发现路基坡脚处地基的水平位移随深度大致呈鼓肚状分布,各工况水平位移最大值出现的深度基本相同。范红英等^[11]研究发现,随着新路基拓宽宽度的增大,老路基坡脚处地基的水平位移逐渐向内侧偏移,而新路基坡脚处地基的水平位移则呈现出向外侧先增后减的趋势,且双侧拓宽的水平位移比单侧拓宽的小。

目前,国内外学者对地基与路基表层变形已

有了较详尽的研究,且各学者的研究结果也大致相同,但是针对路基内部,尤其是新老路基结合处的变形与受力状态研究较少。

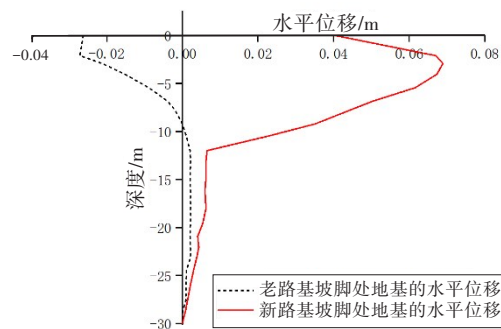


图4 新老路坡脚下水平位移沿地基深度的变化^[12]

Fig. 4 Variation of horizontal displacement along the depth of foundation under the foot of new and old road slopes^[12]

1.3 路基拼接差异沉降主要计算方法

新老路基各点的沉降值不一致,导致地表的平整度发生了变化,由此产生了差异沉降。差异沉降既指新老路基结合处,也指新老路基表面的不均匀沉降。计算沉降的方法主要有弹性理论法、分层总和法、应力路径法、考虑蠕变变形的沉降计算法和数值模拟分析法,现在较多使用数值模拟来分析路基的差异沉降。

1.3.1 弹性理论法

弹性理论法常用于瞬时沉降的计算,其以弹性半无限体的Boussinesq解为基础,假设地基为一个半无限、各向同性的弹性体。当荷载作用在地基表层时,使用Boussinesq解能起到近似作用;当荷载作用位置较深时,采用Mindlin课题的位移解弹性理论法更适合^[13]。在实际工程中,土是分层填筑的,因而不是不均匀的,且具有各向异性,这与基础假定具有较大出入,因此采用弹性理论法计算路基沉降时,只能取近似值对结果进行应用^[14]。

1.3.2 分层总和法

分层总和法根据土的性质和应力变化,将基础以下的地基土划分为若干层,然后单独求解每一层的压缩变形量,最后将各分层的压缩变形量累加得出地基土的总沉降^[15]。在建筑行业中,分层总和法被广泛认可并采用,无论是行业规范还是标准,都将其作为指定的计算方法。

分层总和法基于连续介质理论来计算土体的附加应力,且认为在加载过程中地基土的力学参数是始终保持不变的,这与工程实际存在差异,因

此部分学者提出了改进方法。蒋红英等^[16]基于随机理论,构建了一种适用于非连续介质的附加应力传递模型;曹文贵等^[17]通过探讨直线圆锥应力分析方法获得了半无限曲线圆锥应力的求解方法,进而提出了竖向集中荷载作用下散体地基应力的解析方法。贺敏等^[18]考虑粗粒土地基散体介质特征,基于孔隙介质力学理论,提出了适用于粗粒土地基沉降量计算的分层总和改进方法。总的来说,分层总和法给高填方路基沉降计算提供了一个很好的思路,但是如果完全按照规范中的方法进行计算,有些假设误差便难以避免^[19]。

1.3.3 应力路径法

应力路径概念最早是由 LAMBE^[20]于1967年提出来的,用来表示应力变化的轨迹,如图5所示,图中, σ 为主应力, τ 为切应力, $p=(\sigma_1+\sigma_3)/2$ 为平均主应力, $q=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ 为剪应力, σ_1 、 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力^[21]。应力路径法能够模拟施工前期、中期以及后期地基内部应力的完整变化过程,既考虑了瞬时沉降又考虑了主固结沉降。应力路径示意图的画法为:将各应力的变化状态点绘制在 p - q 曲线中,按应力变化过程把这些点连接起来即得到应力路径曲线。

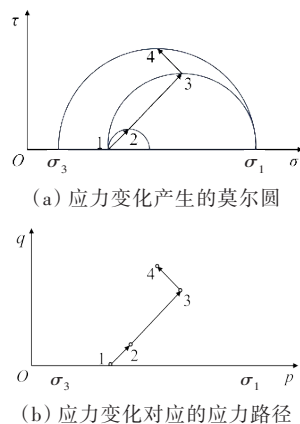


图5 应力路径示意图^[21]

Fig. 5 Stress path schematic diagram^[21]

通过应力路径法计算沉降,首先,需要获取现场土体中某些具有代表性的单元的有效应力路径;然后,进行常规室内三轴试验,量取试样各阶段的垂直应变,并乘以土层厚度得到地基初始沉降及最终沉降。然而,该方法局限性较大,对土样和试验操作要求较高,且在计算过程中不容易选出代表性单元,增加了计算难度^[22]。

1.3.4 考虑蠕变变形的沉降算法

在荷载作用下,地基的总沉降可以分为瞬时沉降、主固结沉降和次固结沉降3个部分,其中,次固结沉降属于蠕变沉降,而工后沉降中的主固结沉降包含了蠕变沉降^[23]。蠕变沉降是指在有效应力不变的情况下,由时间因素引起的缓慢沉降,地基在应力作用下只要时间在持续,蠕变沉降就会产生^[24]。王盛源等^[25]引入指数函数作为蠕变函数,利用弹性体和黏弹性体之间的关系,成功推导出了一维固结沉降的理论公式,该公式涉及的问题较为复杂,尽管在理论上有所创新,但在实际工程中尚未得到广泛应用。陈宗基等^[26]针对黏土在剪应力作用下的变形情况,构建了基于Maxwell模型的黏土三维固结理论,该理论被用来求解一维和三维特殊边界问题。WANG等^[27]根据软土的流变学和结构特性,建立了预测路基变形的蠕变损伤力学模型,该模型能较好地描述软质路基在预压和施工后期的变形。姚仰平等^[28]在考虑时间效应的UH模型的有限元计算方法和分层总和法相配合的一维简化蠕变沉降计算方法的基础上,提出了一种针对高填方地基蠕变沉降的实用算法。土的蠕变变形主要受时间和历史应力等因素的影响,其经验计算公式虽然形式简单,便于工程人员操作,但是参数缺乏实际的物理意义,因而在研究中可以通过完善参数来改进公式。表1为现有的蠕变计算方法^[23]。

表1 现有蠕变计算方法

Table 1 Existing creep calculation methods

方法	表达式	独立参数	参数获取方式	特点
三点法	$s = s_{\infty}(1 - \alpha e^{-\beta t})$	$s_{\infty}, \alpha, \beta$	取等时距的三点,求解多元方程组	数据需求少,对数据要求高
星野法	$s = s_0 + \frac{CK\sqrt{t-t_0}}{\sqrt{1+K^2(t-t_0)}}, t \geq t_0$	s_0, t_0, C, K	整理数据,拟合直线	收敛快,对数据有一定的需求,对定义域有限制
双曲线配合法	$s = s_0 + \frac{t-t_0}{\alpha + \beta(t-t_0)}$	s_0, t_0, α, β	整理数据,拟合直线	收敛快,参数少,未考虑沉降的发展趋势

注: s 为总沉降量; s_{∞} 为最终沉降量; t_0 、 s_0 分别为基准时间及其对应的初始沉降量; α 、 β 、 C 、 K 为计算参数。

1.3.5 数值模拟分析法

数值模拟分析法作为解决各类复杂数学物理问题的一种重要方法,对于处理各类复杂工程问题具有十分重要的意义,同时它还是开展科学研究的一种重要手段^[29]。有些问题的边界条件十分复杂,具有非均质、非线性特征,导致微分方程中未知函数的系数为变系数,增加了求解难度,且难以用数学方法求解得到这些问题的精确解或通过模拟试验得到其定量解。而数值模拟分析法使得这些复杂问题得以解决,该方法通过计算机程序分析处理各向异性、非均匀材料问题,可解决非线性问题,能适应复杂的边界条件,使具有非线性应力应变关系、非均质和各向异性的土体在复杂边

界条件下的求解成为可能。目前,数值模拟分析法已被广泛应用到改扩建工程的不同工况中,包括特殊土质的改良^[30],环境条件变化下的路基沉降^[31],路基拓宽对老路基附加沉降的影响^[32]等。

在进行路基沉降计算时,有一些假设条件,而数值模拟通常可以处理复杂的边界条件并求解得到路基沉降。但是,在使用数值模拟计算沉降时,往往只考虑了路基本身的固结、路面结构层和汽车荷载等因素,很少考虑温度、湿度对路基沉降的影响。因此,可以进一步完善沉降模型,在数值计算时考虑温度场、湿度场对沉降的影响,使得数值模拟环境尽可能地接近施工现场的实际情况。

几种路基沉降计算方法优缺点对比见表2。

表2 几种路基沉降计算方法优缺点对比

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of several subgrade settlement calculation methods

方法	缺点	优点
弹性理论法	适用于地基比较均匀的土层,计算结果取决于初始与终了应力水平	计算过程简单,常用于一般的沉降估算
分层总和法	地基土变形力学参数在加载过程中始终不变	物理概念清楚,计算方法较简单
应力路径法	不考虑土体侧向变形,对于复杂的土体结构,计算步骤相对烦琐	模拟土体实际的历史应力
考虑蠕变变形的沉降算法	经验公式的参数缺乏实际的物理意义	可同时考虑时间和历史应力等因素的影响
数值模拟分析法	路基和地基土被认为是均匀的、连续的、各向同性的弹塑性材料	能对所涉及各类复杂地基、本构模型、边界条件和复杂形体等问题进行分析 ^[33]

1.4 路基拼接差异沉降控制标准

我国《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)中关于软土地基路基容许工后沉降的标准见表3。

表3 软土地基路基容许工后沉降标准^[34]

Table 3 Standard for allowable post-construction settlement of soft soil subgrade^[34] m

公路类型/等级	桥台与路堤相邻处	涵洞、通道处	一般路段
高速公路、一级公路	≤0.10	≤0.20	≤0.30
二级公路	≤0.20	≤0.30	≤0.50

邢启军等^[35]、董海等^[36]、周虎鑫等^[37]对我国高等级公路的工后差异沉降指标进行了总结,认为在纵坡、横坡和平整度3个因素中,平整度对差异沉降指标的要求最严格,因此,在不影响路面功能的前提下,容许沉降坡差为0.40%。章定文^[38]运用弹性力学理论,通过解析法深入分析了路基不均匀沉降所诱发的路面结构层中的附加应力,发现路面结构层所容许的不均匀沉降差亦为0.40%。

众多学者^[39-43]认为差异沉降控制标准的确立,应基于路面的功能要求和结构要求进行综合

分析。从应力角度来看,由差异沉降引起的路面结构应力水平必须保持在路面材料所能承受的应力极限之内,以确保路面结构在使用年限内不出现结构性破坏,并保持预期的性能标准;从变形角度来看,新老路基土的性质存在差异,沉降时间长短也不同,造成纵坡、横坡以及平整度产生一定的变化,差异沉降导致的路面变形还应符合路面使用功能的要求^[44]。因此,有必要从这两个方面对沉降控制标准进行分析。张军辉^[45]通过分析已有理论成果和实体加宽工程,认为在加宽工程中,路面结构的差异沉降控制标准应该取功能指标和结构指标二者中的较低值,取加宽施工期老路容许差异沉降(即老路中心与老路肩之间的沉降差)标准为0.25%,加宽工后新路容许差异沉降(即新路肩与最大沉降点之间的沉降差)标准为0.20%。高志伟^[46]将与排水功能密切相关的因素作为山区高速公路的主要控制指标,在综合评估了路面结构的抗拉破坏性能和抗疲劳破坏性能后,提出了一套适用于山区高速公路设计的差异沉降控制标准,该标准基于结构性要求与功能性要求,推荐变

坡率不应超过0.35%。傅珍^[47]在确定差异沉降的控制标准时,考虑到路面的结构性要求,建议以4.1 cm作为判断标准,相应的变坡率应维持在0.20%;而从功能性要求的角度考虑,建议取路拱横坡变坡率为1.70%左右;当考虑到平整度时,变坡率则为0.46%。

单、双侧拓宽等不同的拓宽方式对地基产生的应力变化有所不同,造成的路基差异沉降也大不相同,因此不同的拓宽方式需采取不同的差异沉降标准。叶永城等^[48]依托佛开高速公路单侧拓宽工程建立了老路基施工阶段和拓宽后的差异沉降控制标准,该标准规定变坡率不超过0.56%。杨涛等^[49]提出了双侧拓宽工程的差异沉降控制标准(依据差异沉降曲线的具体形态进行区分):当差异沉降曲线表现为“马鞍”形的分布特征时,拓宽路基的差异沉降控制标准为工后变坡率严格控制在0.30%以内;当差异沉降曲线表现为“倒钟”状分布时,拓宽路基的差异沉降控制标准为工后变坡率不得超过0.45%。

总结已有的理论研究成果,发现其中的沉降控制标准差别较大,容许沉降坡差在0.20%到0.46%之间变化。早期学者认为应满足路面结构性要求,即容许的不均匀沉降差不超过0.40%;后来有学者认为应取功能性指标要求和结构性指标要求中的较低值,即取加宽工后新路容许差异沉降标准为0.20%,该结果有较强的说服力。对于山区高速公路,为确保满足结构强度和使用功能的双重需求,规定变坡率应严格控制在0.35%以内。

2 路基拼接差异沉降影响因素分析

拓宽路基相当于在地基上增加了外部荷载。外部荷载的出现迫使新老路基内部发生应力重分布,外部荷载自重越大,所引起的新老路基内部应力重分布越严重,而拓宽高度与宽度、填料、弹性模量等因素都与外部荷载的自重息息相关^[50-51]。

2.1 路基拓宽方式

与单侧拓宽路基相比,双侧拓宽能在一定程度上减小新老路基的最大差异沉降。当对老路基进行双侧等宽度拓宽时,路堤应力分布得到重新平衡,并均匀作用于老路基两侧。这将显著优化新老路基的沉降曲线形态,同时有利于路面结构

受力^[52]。沈国印等^[53]从受力和变形的角度进行分析,认为双侧拓宽相较于单侧拓宽更具优势。范红英等^[11]依托西通高速公路项目,建立了单侧及双侧拓宽方式的路基沉降数值模型,并运用有限元分析方法模拟了路基顶面差异沉降以及坡脚水平位移的变化情况,结果表明,在加宽宽度相同的情况下,双边加宽模式下老路基中心沉降的减大幅度比单边加宽模式下的15.2%。郑勇^[54]对拓宽方式进行了研究,发现双侧拓宽的方式比单侧拓宽的好,单侧拓宽造成新老路基的水平位移比双侧拓宽的大得多,其原因是双侧对称加宽使得加宽路堤的质量更均匀地分配到路基两侧,进而使路基受力更加平衡。因此,在加宽宽度固定的情况下,两侧加宽比一侧加宽更容易减小道路的差异沉降^[55]。

2.2 新路基拓宽高度

新路基拓宽高度越高,作用在地基上的外荷载越大,对地基的应力重分布的影响越大。任海铭^[56]、LIU等^[57]就新路基拓宽高度对路基顶面沉降的影响进行了分析,结果显示,当新路基拓宽宽度相同时,随着填土高度的降低,新路基对老路基的影响相应减弱,老路基沉降的幅度有所下降,其沉降曲线的前段较平缓,老路基在初始阶段的稳定性得到了提升。聂鹏飞等^[58]系统分析了新路基在不同填筑高度下的竖向沉降、水平位移、竖向应力及剪应力等力学响应,如图6所示。从图6可以看出,随着新路基填筑高度的增大,由土体质量产生的竖向应力总体上呈增大趋势;当新路基拓宽高度从2 m增加到10 m时,竖向沉降总体增幅达到了146.6%,水平位移总体增幅达到了105.3%,且随着土体竖向沉降的增大,其剪应力也出现了较大幅度的增长。路基的水平位移与竖向沉降随着新路基填筑高度的增加而增长,然而这种增长速率是逐渐减小的,且随着填筑高度的进一步增加,减小得更为明显^[48],路基控制沉降的能力随着填筑高度的增加在不断减弱,因此新路基填筑高度不宜过高。丁锐^[50]对地基的水平位移进行了研究,发现随着路基填筑高度的增加,老路基坡脚处向内的水平位移和新路基坡角处向外的水平位移也在逐渐增大,且随着新路基稳定时间的增长而增大。故在新路基的高度设计中,应当适当地调整填筑高度来降低新老路基结合处的差异沉降。

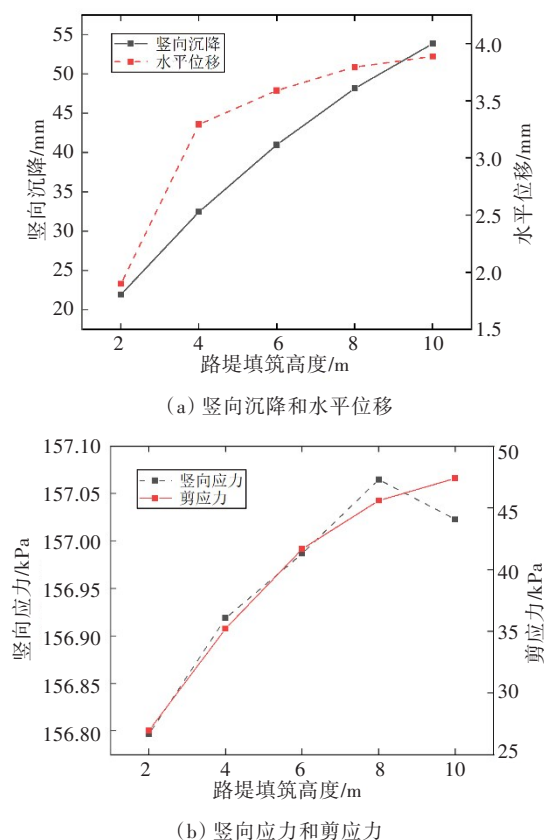


图6 新路基在不同填筑高度下的力学响应^[58]

Fig. 6 Mechanical response of new subgrade under different filling heights^[58]

2.3 新路基拓宽宽度

新路基拓宽宽度对路基及地基的变形影响显著,较小的拓宽宽度可以更好地控制新老路基的差异沉降及地基沉降^[59]。随着路基宽度的增加,最大地表沉降的发生位置向道路外侧移动,但基本保持在新路基中心线之下^[45]。聂鹏飞等^[58]研究发现,相较于填筑高度,拓宽宽度对新老路基的影响更明显,竖向沉降、水平位移及竖向应力都随着拓宽宽度的增加与其成线性关系。范红英等^[11]依托西通高速公路项目,在拓宽方式的基础上,对拓宽宽度进行了进一步探究,结果发现,随着拓宽宽度的增大,老路基中心沉降的增量逐渐减小,最大沉降位置在距离新路基边缘内侧3~5 m处^[60]。大量工程实例^[61-62]表明,选择合适的拓宽宽度或适当减小拓宽路基填土的质量,可以有效减小应力集中导致的不均匀沉降^[63]。

2.4 新路基填料

高速公路改扩建工程中所选择的填料往往不尽相同,填料本身的性质、填料与填料之间的压实度、施工工艺和自然条件等众多因素都会对路基

沉降造成影响。胡志文^[64]通过 ANSYS 软件分析了路基填料质量对双侧拓宽路基差异沉降的影响,拓宽路基沉降值随着路基高度的增大而增大,也随着路基填料质量的增大而增大。张梅意^[65]通过正交试验方法,分析了5个填料参数对拓宽路基顶部差异沉降的影响,结果表明,这5个填料参数对拓宽路基表面差异沉降的影响程度从大到小的顺序为:填料质量、弹性模量、泊松比、摩擦角、黏聚力。新路基土体参数中黏聚力、内摩擦角和弹性模量的变化对路基和地基变形的影响很小。吴福宝^[66]利用软件模拟了填料压实度对路堤工后240 d沉降的影响,发现填料压实度和路堤工后沉降之间的关系可以划分为3个阶段:首先是衰减阶段,在该阶段填料压实效率提升最为明显;其次是过渡阶段,此时填料压实效率相比前一阶段有所降低;最后进入稳定阶段,在此阶段对填料进行压实,从沉降角度来说,其效率几乎为零。夏英志等^[67]开展了填料压实度对路堤差异沉降的影响研究,发现填料压实度影响路基后期沉降,填料压实度越大,路基土后期沉降越小,但沉降的减小幅度较小。因此,在实际工程中,通过提高压实度来减小路基后期沉降,效果不明显。

2.5 地基土性质

新老路地基土性质差异较大,老路地基土体参数整体上明显大于新路地基土体参数,导致新老路地基竖向沉降差异显著,从而增加路面纵向开裂风险。王才进等^[68]对新老路地基土体的沉降量进行计算,发现新老路地基土体在深度0~7 m时沉降量较大,且新路地基土体的沉降量明显大于老路地基土体的沉降量^[56]。贾宝新等^[62]基于有限差分原理建立了三维有限元数值计算模型,认为适当提高新路基土体的弹性模量和压缩模量有助于减小新老路基间的差异沉降。因此,采用复合地基可以有效减小差异沉降^[69]。宋文佳^[59]主要研究了地基土体弹性模量的变化对路基表面沉降的影响,发现随着地基土体弹性模量的增加,新老路基表面的最大沉降值与最大差异沉降值均呈减小趋势。因此,可以通过提高新地基土体的压缩模量和弹性模量,使其与老地基土体的压缩模量和弹性模量更加吻合,以减小路面沉降。

综上所述,对新老路基差异沉降影响最显著的是拓宽宽度^[58],其次是填筑高度、地基土性质、路基填料性质^[70]。而在填料性质方面,拓宽路基

表面差异沉降受填料自身质量影响程度最大,其次是弹性模量、泊松比、摩擦角、黏聚力^[69]。拼接路堤的差异沉降、水平位移与填筑高度及宽度、填料质量成正相关关系,与弹性模量成负相关关系。因此,在设计拼接路基时,应综合考虑各因素,以达到减小差异沉降的目的。

3 路基拼接差异沉降处治措施

拼接路基的处理与新建路基的有所不同。若拼接路基的处理技术应用不当,将会造成不同程度的道路病害,轻则路面损坏,重则路面整体性能下降、路基失稳。因此,拼接路基对施工工艺、处治措施的要求更高。路基拼接处治旨在提高新老路基的整体性,可在老路加宽施工过程中把不均匀沉降控制在一定范围内。

3.1 压实技术

新老路基压实度不同是产生差异沉降的原因之一。填土压实度越大,路基土后期沉降越小,因此,可以通过适当提高新路基压实度来减小新老路基间的差异沉降。压实过程包括压密、破碎和稳定3个阶段,如图7所示。

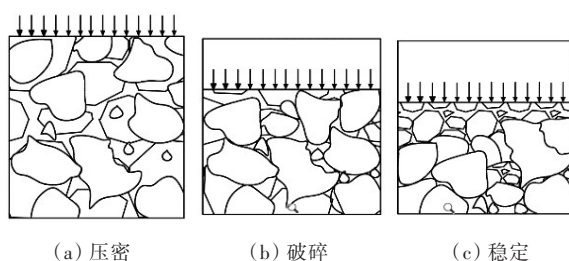


图7 压实过程的3个阶段^[71]

Fig. 7 The three stages of the compaction process^[71]

3.1.1 静力压实

静力压实是一种依靠物体本身质量对填料进行压实的方法,受物体自身的影响较大,在尺寸和质量的限制下,静力的大小十分有限,其实质是挤出土中气体,而不是挤出土中水分^[72]。因此,采用静力压实方法只会使土体产生轻微形变,其作用比较小,难以使土体达到较大的密实度。另外,静力压实存在一个极限的压实效果,无限量地增加荷载不但得不到理想结果,还可能造成结构破坏。

3.1.2 振动压实

振动压实通过振动仪器将振动波传递给填料,迫使填料发生共振。与静力压实相比,振动压

实的压实效果更好,作用深度更大。唐秀明等^[73]开展了海砂路基填料的室内振动压实试验,以研究压实度和含水率对填料弹性模量及强度的影响,研究发现,振动压实可以显著提升海砂路基填料的工程性能,相比于传统静力碾压方法,振动碾压处理后的海砂填料在弹性模量和强度上表现出更为明显的优势。闫丛军等^[74]开展了填石路基的振动压实试验,研究施工过程中压实设备、铺层厚度、碾压次数和沉降量等因素之间的相互作用关系,以及影响填石路基压实效果的主要因素,为制定合理、高效的路基压实工艺奠定了基础。阚志涛^[75]在研究振动压路机时,综合考虑了振幅、振动频率及行进速度这3个关键因素对填料压实度的影响,选择质量为20 t的单钢轮振动压路机作为压实设备,以黄土为填料,通过正交试验获得了压实度与上述3个因素之间的线性关系曲线。

3.1.3 夯击压实

夯击压实是通过将机械落锤时产生的势能转化为冲击能来对路基填料进行夯实的,包括重锤夯实和强夯。夯击压实法虽然压实效果好,压实深度大,但其主要缺点在于对靠近边坡的位置无法使用该法,还须配合碾压机械使用。

目前,关于夯击压实法的研究主要涉及以下几个方面:地基材料的改善原理;强夯施工设计参数及有效加固深度的确定;强夯法的力学模型;在强夯时,夯击能对地基材料孔隙水的影响;强夯对周围构筑物的振动影响范围等^[76-77]。倪宏革等^[78]以潍坊市北海路深坑高填路堤工程为例,开展了不同夯击能作用下的强夯现场试验,对高填方路基的土体变形规律进行了研究。翁效林等^[79]以浸水入渗条件下高速公路拓宽工程为研究载体,建立了与实际应力相符的离心试验模型,通过试验揭示了拓宽路基在浸水增湿后的沉降变形特征及拓宽地基的强夯处治效果。强夯法对黄土地基的湿陷性具有良好的改善作用,可以在一定程度上确保拓宽路基的整体稳定性^[80]。

3.1.4 冲击压实

冲击压实机的工作原理是利用高速旋转的冲击轮冲击碾压地基,使其形成均匀、紧密的土体结构,以增强地基承载力。冲击压实技术具有机械化程度高、工艺简单、施工速度快、工作效率高、调动灵活等优点。近年来,冲击压实技术已开始改扩建工程中进行应用。杨世基^[81]通过分析冲击

压实机理,结合工程实例,认为冲击压实技术具有减小路基工后沉降、提高路基整体强度及加固软弱地基的作用。宋修广等^[82]采取冲击碾压法压实黄河冲积平原区粉土路基,发现冲击碾压能显著提高粉土路基的承载力和压实度。陈旭^[83]通过冲击压实技术在广州白云国际机场迁建工程Ⅱ标段主跑道土石方工程中的应用,对冲击压实前后的沉降量、固体体积率以及回弹模量的测试结果进

行分析,发现冲击压实技术在机场跑道地基的增强补压上效果显著。冲击压实技术融合了传统机械碾压与强夯的优势,是一种高效的路基压实技术,在增强高速公路路基承载力的同时,确保了施工的均质性和可靠性,在公路建设上具有广阔的应用前景,值得大规模推广和应用^[84]。

上述几种压实方法的优缺点以及适用情况见表4。

表4 几种压实方法的优缺点和适用情况

Table 4 Advantages and disadvantages of several compaction methods and their application

方法	优点	缺点	适用情况
静力压实	无振动,施工快,压实层均匀密实,且不伤路基	压力主要集中在表层,工作效率较低	浅层加固
振动压实	振动频率高	易对周围环境造成影响	砂土、碎石等黏结性低的松散土石
夯击压实	夯实力大,贯穿能力强,具有更大的压实度和强度	振动大,噪声高,需要远离结构物施工,施工时间有限制	处理深度最好不超过15 m,地下水位距地表2~3 m为宜
冲击压实	施工速度快、效率高、成本低,可以修补各种路面缺陷	相对于强夯,压实深度小	用在强夯法无法施工的地方,比如地下水源保护区、交通要道等

目前,计算机技术在公路工程建设中的应用不如在其他领域中应用得广泛,因而还有很大的应用空间。将计算机技术与相关工程信息系统相结合,是公路工程建设中一个切实可行的尝试^[85]。压实技术在向智能化、自动化、无人化方向发展。路基智能压实技术的关键在于如何动态调整压路机参数,以最大限度地提高压实工作效率^[86],其工

作原理是基于振动压实机械与压实填料之间相互作用的反馈信息,通过综合分析压实填料作业面的压实状态,智能地调整压实机械的行驶速度、振动频率以及振幅等施工参数,从而实时优化振动压实效果。这一过程可避免压实区域出现过度压实或压实不足的情况,同时可提高整个压实工作效率^[87]。智能压实原理如图8所示。

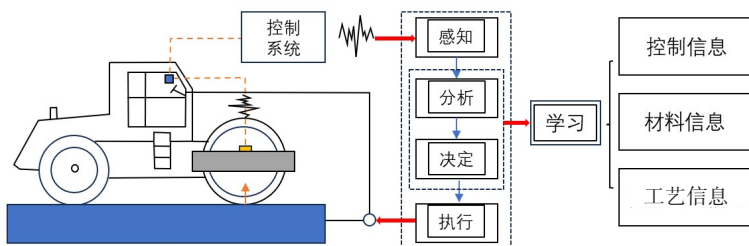


图8 智能压实原理图^[85]

Fig. 8 Intelligent compaction principle diagram^[85]

目前,智能压实已在以下几个方向取得了突破:基于无人驾驶模式,开发适合于站场等大体积路基碾压作业的无人驾驶技术,按规划路径对站场路基进行自动碾压;结合压实连续检测技术和北斗导航技术,自动规划不合格区域的碾压路径,实现对不合格区域的自动补压;利用图像检测技术实现一定粒径范围内的填料级配自动识别;开发路基智能填筑指挥系统,实现对路基填筑过程

的标准化、信息化管理^[86]。研究者们致力于优化路基碾压参数,马涛等^[88]通过对有限元数值仿真软件进行二次开发,实现了数值仿真精细化建模,获取了压实质量最好时所对应的参数。陈晓斌等^[89]通过开展室内振动压实试验,建立了振动参数与干密度之间的定量关系,提出了适用于动态优化的遗传算法的最佳参数,并在此基础上提出了一种基于振动能量最小原则的振动参数优化方

法。智能压实实现了压实过程的可控性和可视化,且通过参数的优化,不仅节省了碾压成本,也提高了碾压效率和施工安全性。因此,智能压实技术将成为智能建造时代的大势所趋。

3.2 台阶处治

在考虑台阶开挖尺寸时,必须综合考虑老路基边坡的填筑材料和压实度等因素。以沪杭甬高速公路为例,由于老路基使用矿渣为填料,其边缘压实度不足,因此为了确保施工安全和最终结构的稳定性,选择了较大的台阶开挖尺寸。此外,坡脚附近的台阶稍宽一些,通常为2~3 m^[90]。图9为台阶处治示意图。

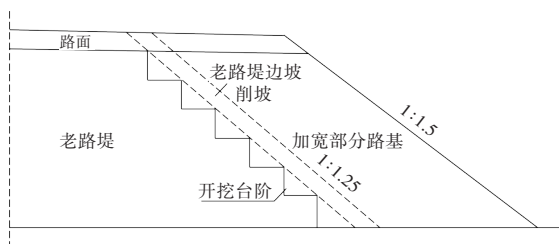


图9 台阶处治示意图

Fig. 9 Step treatment schematic diagram

刘涛等^[91]利用ABAQUS软件建立了高液限黏土路基加宽有限元模型,并就开挖台阶和不开挖

台阶两种情况对差异沉降的影响进行了对比分析,发现开挖台阶可以有效减小施工过程中的差异沉降,同时也在一定程度上降低了工后沉降。高翔^[92]分别对不同的削坡方式及开挖顺序进行了模拟,发现虽然两种不同的削坡方式对新老路基的影响相似,但从施工角度来看,自下而上开挖要稍优于自上而下开挖。陈星光^[93]深入探究了开挖台阶尺寸及台阶表面内倾角对路基稳定性的影响,分析了在台阶高度不变的情况下台阶宽度变化,以及台阶宽度不变的情况下台阶高度变化对路基水平位移和沉降的影响。研究结果显示,当台阶高度保持不变时,增大台阶宽度能有效降低路基的水平位移和沉降量;当台阶宽度保持不变时,路基的水平位移和沉降会随着台阶高度的增大而增大。沈国印^[94]采用有限元方法分析了5种不同的边坡削坡方式和台阶开挖方法,研究结果表明,在进行削坡和开挖的过程中,老路堤边坡削坡和台阶开挖量越大,老路基及其下面地基的上抬现象就越明显,对老路的影响也就越大。

台阶开挖形式有4种:标准式、内倾式、竖倾式和内挖式^[95]。表5列出了国内部分高速公路改扩建工程中的削坡与台阶开挖方式。

表5 国内部分高速公路改扩建工程中削坡与台阶开挖方式

Table 5 Slope cutting and bench excavation methods in highway reconstruction and expansion projects in China

工程项目	削坡与台阶开挖方式	备注
广佛高速公路	粉喷桩处理:第一阶段按照1:0.8的坡率进行老路边坡开挖,第二阶段按照1:0.5的坡率开挖边坡;旋喷桩处理:按照1:0.5的坡率开挖老路边坡	
沪杭甬高速公路	挖成台阶状,台阶高度控制在80 cm左右,宽度为100~200 cm	老路填料为矿渣,边缘压实度不够
沈大高速公路	从土路肩向下按照1:0.5的坡率开挖,并挖成高度不超过80 cm的台阶,台阶面向路中心呈3%的横坡倾斜,台阶挖至与原地面平齐	内倾式台阶
海南环岛东线高速公路	从坡脚向上开挖宽度为100~150 cm、内倾角为2%~4%的反向台阶	内倾式台阶
沪宁高速公路	清除地表30 cm厚的压实度不足的土,挖成台阶状,台阶高度控制在60~70 cm,宽度大于100 cm;为方便新老路基接缝处的压实,台阶形式设计为台阶坡面向老路基竖向倾斜,坡率为10:1	
南京绕城公路	从坡顶自上而下开挖成台阶状,台阶高度控制在80 cm左右,宽度为100~200 cm	
沪宁-锡澄高速公路直接拼接段	每个台阶高度为80 cm,底宽为120 cm,台阶底面向路中心呈2%的角度倾斜,台阶挖至与原地面齐平	内倾式台阶

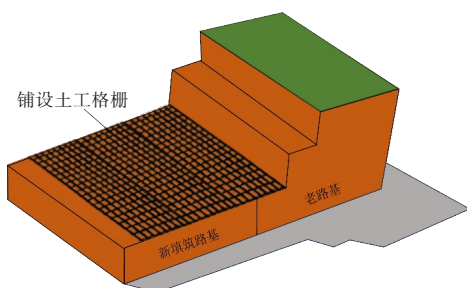
并不是台阶尺寸越小,拼接效果就越好,过小的台阶尺寸会导致新老路基拼接界面的接触面积过小,进而使新老路基间的结合力过小,不利于路基的整体稳定性;但是台阶尺寸也并非越大越好,台阶尺寸过大会引致更大的卸荷和重复加载作用,这可能会增大老路基的挖掘回弹效应和新路

基的填筑固结作用,对新老路基的差异沉降产生更加显著的影响^[96]。在大多数工程情况下,开挖台阶随着土工格栅的铺设一同进行,台阶为土工格栅的铺设提供一定的锚固长度,该施工工艺更好地增强了新老路基的衔接。关于台阶面上的内倾角,学者们认为内倾角的嵌锁作用可以增强新

老路基的衔接,因此,国内高速公路改扩建工程中大多采用2%~4%的台阶内倾角。

3.3 筋材处治技术

土工筋材能够增强结构层刚度,有效抵抗反射裂缝,保证结构层的完整性,对提高路堤填筑高度、减小路堤水平位移、均化路堤沉降效果显著^[97-99]。研究者们通过室内外试验、数值模拟来研究加筋层数、布设位置以及筋材参数对路基差异沉降的影响规律。图10为土工格栅处治示意图。



(a) 示意图



(b) 实物图

图10 土工格栅处治图

Fig. 10 Grille treatment diagram

3.3.1 筋材处治效果与应变规律

羊晔等^[100]通过室内小比例模型试验模拟高速公路过渡段施工中经常采用的土工格栅加筋路基,发现土工格栅加筋路基可明显调节过渡段的不均匀沉降。MIAO等^[101]通过物理模型试验,使用装满水并放置在路堤下方的水袋来模拟路堤加宽部分的软基础,从水袋中抽水以模拟现有路堤和加宽基础之间差异沉降的发展,发现铺设土工格栅能够减小软土地基过渡段的不均匀沉降,且在路堤破坏后土工格栅起到的作用更大。汪益敏等^[102]通过设计几何相似比为1:10的室内模型,采用相同的加筋材料进行室内模型试验,发现土工格栅在老路堤结合处的受力最大,格栅对路堤顶面沉降起到了较好的均化效果。

SHEN等^[103]通过离心模型试验,从孔隙水压

力消散、沉降特性、路基整体稳定性几个方面,研究格栅加固在加宽路基中老路基交界处的治理效果,研究发现,格栅加固处理可以降低新路基的孔隙水压力,调节荷载应力扩散,使路堤顶部不均匀沉降的斜率比降低了约0.3%。位于老路边坡附近的格栅出现较大拉伸应变,其最大值出现在距离格栅左端1/3长度处,而与新路边坡相邻的格栅,其拉伸应变相对较小。傅珍等^[104]通过土工离心模型试验,对比了以土工格室为主的多种加筋方案,对新老路基在拼接过程中的路基表面沉降变化规律进行了详细分析,发现在半年内,新老路基填筑期内的路基沉降占总沉降的70%以上。以上学者的研究结论基本一致,即土工格栅加筋结构可以较好地均化路堤顶面的沉降分布,降低路基内的土拱效应,提高加宽路堤的使用性能。

总的来说,土工格栅可以有效控制路基的不均匀沉降,降低不均匀沉降给路面带来的风险,以防道路在使用年限内出现不必要的修整。对于格栅的受力,有研究者通过研究发现,在靠近老路边坡的位置应变较大,在新路边坡的位置应变较小。但是,少有研究者针对格栅受力进行优化处治。

3.3.2 加筋层数与布设位置

降低新老路基差异沉降的效果与所铺设的土工格栅的加筋层数和加筋位置都息息相关。晏莉等^[105]运用FLAC软件,从路基位移、路基顶面应力及土工合成材料的拉力分布等方面分析了不同加筋层数的处治效果,研究结果表明,仅盲目增加土工合成材料的层数并不能最大化发挥加筋效果,因此应合理选取加筋层数。杨涛等^[106]研究了土工格栅嵌入老路基的长度、格栅设置层数对格栅拉力、拓宽路堤的不均匀沉降以及水平位移的影响。结果表明,格栅嵌入老路基的长度越长,拓宽路堤的水平位移和新老路基的差异沉降就越小,增加格栅层数并不会显著减小拓宽路堤的差异沉降。汪益敏等^[107]利用自行设计的模型试验系统进行研究,发现在拓宽路堤填土的顶部与底部分别设置一层土工格栅加筋层,能够有效降低拓宽路堤填土的竖向应力和沉降。AHMAD等^[108]评估了折叠土工格栅的层数对基础沉降量的影响,研究发现,在基础下方的某个特定深度,存在一个临界区域,在这个区域内折叠土工格栅会增加基础的沉降量,折叠土工格栅的最优埋置深度为基础宽度的0.41,厚度为基础宽度的0.20,增加折叠土

工格栅的层数可以明显减小沉降比。翁效林等^[109]在土工离心机上安装加载装置和位移、应力测量系统,建立与实际应力相符的离心试验模型,在拓宽路基拼接带的不同层位布设土工材料,研究结果表明,加筋处治使地表以下浅层土体的水平位移的减小幅度较大,而深层土体水平位移的改变不大,说明加筋对软基水平位移的影响程度很有限。

首先,并不是土工格栅的加筋层数越多越好。从提高路基稳定性和优化工程成本的角度来说,增加加筋层数并不一定能起到有益的作用,而是应选取合理的层数。其次,土工格栅加筋对地基深层土的水平位移影响不大,说明格栅加筋对地基的影响深度是有限的。在实际研究中,还可以对加筋长度、相邻筋材间距、首层筋材埋深进行优化处治,以便格栅的最大化利用,避免人力、物力、财力的浪费。

3.3.3 筋材物理特性

在使用土工格栅处治新老路基的拼接时,应考虑筋材物理特性对沉降的影响。韩若楠^[110]对比了双向拉伸格栅、钢塑格栅、排扣式嵌固格栅的应用效果,发现排扣式嵌固格栅对于减小路基顶面差异沉降和水平位移效果最佳。观祖保等^[111]分析了路堤填土分别与挡块式土工格栅、普通土工格栅共同受力时的变形特性,发现挡块式土工格栅有利于解决普通土工格栅锚固长度不足的问题,采用挡块式土工格栅能更有效地减小不均匀沉降,增强加筋效果。胡卫国等^[112]对单向土工格栅与双向土工格栅的效果进行了比对分析,发现双向土工格栅的效果比单向土工格栅的好,可以有效防止周围填土的扰动。郑俊杰^[113]对三角形网孔土工格栅和矩形网孔土工格栅对筋土界面特性的影响进行了深入研究,结果表明三角形网孔土工格栅主要表现为横向及对角线方向的挠曲变形,矩形网孔土工格栅则表现为拉伸变形,此外,与矩形网孔土工格栅相比,三角形网孔土工格栅在限制砂土颗粒侧向移动方面效果更佳。曹文昭等^[114]选用双向土工格栅 SS20 和三向土工格栅 TX160 作为研究对象,开展室内直剪和拉拔试验,研究结果显示, TX160 的筋土界面特性在很大程度上受到了竖向压力的制约,在相同的试验环境下,提高竖向压力能显著增强 TX160 与其周边填料颗粒之间的相互作用,进而使筋土的界面特性

得到了优化。唐晓松等^[115]发现土工格栅的网孔结构尺寸对格栅与土之间的界面特性产生了显著影响,因此,土工格栅的网孔尺寸应合理设置,确保格栅与土之间的有效接触面积约占整体界面面积的 1/3。

对于路面移动荷载较大的地区,可以适当选择三向土工格栅或者双向土工格栅。对于高陡坡路堤,可以采用路堤分级的策略来加强路堤的稳定性。“上疏下密”型的布筋方式是最合理的,与“中间密”型以及“均布”型相比,“上疏下密”型更能有效地控制路堤的水平位移^[116-117]。

3.4 填料改良处治

高速公路改扩建工程所选用的填筑材料通常各不相同,填料性质如质量、弹性模量、泊松比等因素都对路基沉降产生影响。对拼接路基中的新路基进行填料改良处治可以改善填料本身的性质,进而减小路堤的压缩变形及路基在行车荷载作用下的累积塑性变形。在现有工程中,多数学者通过在填料中掺入石灰、水泥^[118]、火山灰^[119]等达到改良目的。杜耀辉等^[120]以成武高速公路为研究对象,开展了土工离心模型试验,对泥质岩、水泥和砂砾 3 种不同的改良填料的路基沉降规律进行了深入分析,结果表明,这 3 种改良填料按照固结时间从长到短排序,依次为:泥质岩改良填料、水泥改良填料和砂砾改良填料。有学者^[121]对比分析了桩、土工格栅和轻质填料路堤这 3 种技术,发现轻质填料路堤能显著减小拓宽路基所引起的差异沉降。采用轻质填料路堤有助于减小新老路基间的刚度差异,防止不均匀沉降,而且从理论和实际工程应用的角度来看,采用轻质填料是老路基加宽方案中比较理想的一种措施。曹新玲^[122]发现泡沫轻质土技术可以解决路基加宽时新老路基的差异沉降、高填土路堤的稳定性等世界性难题。孙文^[123]通过室内三轴试验、数值模拟及离心模拟试验等多个试验,研究泡沫轻质混凝土在多年运营期间的路基沉降过程,结果发现这种混凝土在高速公路路基拓宽中具有显著优势。张振等^[124]对比分析了气泡轻质土与常规填料,发现采用气泡轻质土进行路堤拓宽可以有效减小地基土中最大超孔隙水压力增量和附加应力,同时还可以减小拓宽路基与原路基之间的差异沉降。

总的来说,轻质填料可以减小新老路基之间的差异沉降,在路基拓宽时具有明显的优势。因

此,在进行新路基的填筑时,应优先选用强度高但密度较小的建筑材料,以此来减轻新路基的自重,从而降低新老路基结合部位可能出现的形变风险^[125]。

3.5 路基防排水处治

在现场施工中,路基土一般按最佳含水率(optimum moisture content, OMC)压实。由于我国南方气候湿热,路基与周围大气之间的水分迁移会出现剧烈变化,路基含水率从OMC开始逐渐增加,最终达到水分平衡状态。路基水分平衡状态取决于其周围的气候、土壤性质等。在高速公路的改扩建工程中,新路基也采用OMC压实。由于新老路基含水率的差异,水分会在新老路基之间迁移,同时外界的降雨等会使新路基的含水率急剧增加,其永久变形、回弹模量等性能出现劣化。

为了阻止水分从边坡坡面进入边坡内部,研究者们提出了一系列措施,如砂垫层、砂包边、黏土覆盖、土工膜等,并研究了各措施的防水效果。ZHANG等^[126]提出了一种运用垫层和包边控制路堤含水率变化的方法,并选取典型路堤结构建立了一种考虑不同材料、不同厚度的垫层和包边的有限元计算模型,开展了20种瞬态渗流模拟。结果表明,在不考虑大气环境影响的前提下,砂垫层有效地阻断了地下水毛细上升的影响。邓云潮^[127]研究发现在新老路拼接位置处设置碎石渗沟可在一定程度上排除下渗到原路基内部的水分。王珊珊等^[128]为了研究动力排水固结法加固吹填土地基的效果,开展了大比例尺的室内模拟试验,研究结果表明,土体表面铺设的砂垫层不仅可以用来排水,还可以作为静力荷载,有助于土体的排水固结。姚永胜等^[129]采用纵向盲沟与横向盲沟相结合的方法,该方法能够有效处理老路路基边坡的渗水问题,保障拓宽路基修筑的进度和质量。

目前,已有研究者针对路基防排水提出了一系列处治措施,但针对改扩建新老路基的特殊水分迁移规律以及各个措施之间的组合优化设计尚未清晰。

4 结论与展望

本文对国内外路基拼接产生的差异沉降理论、影响因素及处治措施进行了分析,并针对现有

的研究问题进行了讨论与展望,主要结论如下:

1) 通过仿真模拟和现场监测,国内外学者对地基与路基表层变形已有了较详尽的研究,且各学者的研究结果也大致相同,但是针对路基内部,尤其是新老路基结合处的变形与受力状态研究很少,因此,有必要针对路基内部及新老路基结合处进行深入研究,并采取有针对性的优化措施。

2) 目前,老路基边坡开挖台阶仅基于经验的路基台阶处治技术,导致新老路基拼接质量差,可以在此基础上对处治措施进行优化处理,对台阶尺寸、台阶高宽比及松散台阶处治进行优化,提出路基拼接关键技术。

3) 加筋可以有效调整路基应力扩散,均化路堤沉降效果。国内关于高等级公路改扩建工程路基稳定性的研究主要集中在新老路基结合处的处治上,主要研究了格栅与格栅之间的相互作用,格栅网孔和孔间距等因素的影响,建议从受力上对加筋形式进行优化,如加筋长度、相邻筋材间距、首层筋材埋深等。

4) 传统新老路基拼接不均匀沉降计算方法是基于经典弹塑性理论来进行沉降分析及沉降影响因素探究的,未考虑服役期路基土的水分迁移和水稳定性。

5) 目前已有研究者针对路基防排水提出了砂垫层、砂包边等一系列处治措施,但针对改扩建新老路基的特殊水分迁移规律以及各个措施之间的组合优化设计尚未清晰。为保障改扩建路基的性能稳定,有必要在揭示新老路基水分迁移规律的基础上,分析各个湿度控制措施的控制效果,并优化结构。

6) 在改扩建工程中引入智能建养的思想已经成为大势所趋。智能建养包含智能建设和智能养护两个方面,其中,智能建设技术,如智能压实器械、无人机等日益兴盛,推动了路基智能建设的高质量发展。同时,建立路基长期性能的智能监测系统也是路基智能养护的重要前提。智能建养技术的应用将极大地提高改扩建工程的施工效率和质量,无论是在建设过程中,还是在后期养护阶段,智能建养都将成为推动工程发展的重要支撑。

[参考文献]

- [1] 翁效林, 高建华, 宋文佳, 等. 基于拓宽路面附加变形的地基差异沉降控制标准[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(5): 26-31. DOI: 10.19721/j.

- cnki.1671-8879.2013.05.006.
- WENG Xiaolin, GAO Jianhua, SONG Wenjia, et al. Control criterion for foundation differential settlement based on additional deformation in widening pavement [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2013, 33 (5): 26-31. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2013.05.006.
- [2] 孟庆新. 软土路基变形分析与沉降预测[D]. 天津: 河北工业大学, 2006.
- MENG Qingxin. Analyse of deformation and forecast of settlement in expressway soft roadbed [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2006.
- [3] 唐炫. 武广客运专线路基沉降规律试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- TANG Xuan. Experimental study on subgrade settlement law of Wuhan-Guangzhou passenger dedicated line[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [4] 石海丽. 拓宽路基差异沉降及土工格栅处治机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- SHI Haili. Mechanisms of differential settlement of widened embankment and its treatment by geogrid [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [5] 陈民勇, 刘宇, 陈锐, 等. 拓宽路基变形的流固耦合数值分析[J]. 路基工程, 2013 (4): 39-42. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8825.2013.04.009.
- CHEN Minyong, LIU Yu, CHEN Rui, et al. Numerical analysis on fluid-structure interaction of widened subgrade deformation [J]. Subgrade Engineering, 2013 (4): 39-42. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8825.2013.04.009.
- [6] WANG Y, TAN W, ZHAO J, et al. The analysis of the differential settlement of a widened road based on ANSYS [C]// Civil Engineering and Urban Planning 2012. Reston: American Society of Civil Engineers, 2012: 699-703. DOI: 10.1061/9780784412435.126.
- [7] 张军辉, 吴厚铭, 周平. 拓宽路基差异沉降监测及数值分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 14-19. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.003.
- ZHANG Junhui, WU Houming, ZHOU Ping. Widening subgrade differential settlement monitoring and numerical analysis [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 14-19. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.003.
- [8] 贾亮, 贺世开, 朱彦鹏, 等. 高填方路堤工后沉降监测试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(3): 15-19, 25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.03.003.
- JIA Liang, HE Shikai, ZHU Yanpeng, et al. Experimental study on monitoring of post-construction settlement of high-filled embankment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(3): 15-19, 25. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.03.003.
- [9] 葛苗苗, 李宁, 张炜, 等. 黄土高填方沉降规律分析及工后沉降反演预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (3): 745-753. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0014.
- GE Miaomiao, LI Ning, ZHANG Wei, et al. Settlement behavior and inverse prediction of post-construction settlement of high filled loess embankment [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (3): 745-753. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2016.0014.
- [10] 蒋鑫, 蒋怡, 梁雪娇, 等. 软土地基高速公路路基拓宽改建全过程变形特性数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1039-1046. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2015.05.009.
- JIANG Xin, JIANG Yi, LIANG Xuejiao, et al. Numerical simulation on deformation behaviors for widened expressway embankment over soft ground [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12 (5): 1039-1046. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2015.05.009.
- [11] 范红英, 折学森, 边汉亮, 等. 高速公路拓宽方式对路基沉降的影响[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 13-18, 37. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2012.01.003.
- FAN Hongying, SHE Xuesen, BIAN Hanliang, et al. Influence of widening modes on subgrade settlement of expressway [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 13-18, 37. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2012.01.003.
- [12] 章定文, 刘松玉. 软土地基高速公路扩建中新老路堤相互作用数值分析[J]. 中国公路学报, 2006, 19(6): 7-12. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2006.06.002.
- ZHANG Dingwen, LIU Songyu. Numerical analysis of interaction between old and new embankment in widening of freeway on soft ground [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (6): 7-12. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2006.06.002.
- [13] 曹名葆, 王德纯. 用应力路径法分析路堤的稳定性[J]. 土木工程学报, 1988, 21(1): 75-84.
- CAO Mingbao, WANG Dechun. Analysis of stability of embankment with stress path method [J]. China Civil Engineering Journal, 1988, 21(1): 75-84.
- [14] 范玉俊. 高填方路基沉降分析与控制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- FAN Yujun. Study on settlement and control of high fill subgrade [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [15] 赵明华. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2000.
- ZHAO Minghua. Soil mechanics and foundation

- engineering [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2000.
- [16] 蒋红英, 苗天德, 鲁进步. 二维颗粒堆中力传递的一个概率模型[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(7): 881-885. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2006.07.014.
- JIANG Hongying, MIAO Tiande, LU Jinbu. A probabilistic model for force transmission in two dimensional granular packs [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(7): 881-885. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2006.07.014.
- [17] 曹文贵, 贺敏, 王江营. 竖向荷载作用下散体地基应力解析方法[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1165-1172. DOI: 10.11779/CJGE201707001.
- CAO Wengui, HE Min, WANG Jiangying. Analytical method for stress of granular medium foundation under vertical load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(7): 1165-1172. DOI: 10.11779/CJGE201707001.
- [18] 贺敏, 郭卡都, 曹文贵, 等. 条形基础作用下粗粒土地基沉降计算改进方法[J]. 人民长江, 2023, 54(10): 170-176. DOI: 10.16232/j. cnki. 1001-4179.2023.10.024.
- HE Min, GUO Kadu, CAO Wengui, et al. Improvement method of coarse-grained subgrade settlement calculation under strip foundation [J]. Yangtze River, 2023, 54(10): 170-176. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2023.10.024.
- [19] 德圃榕. 高填方蠕变沉降计算方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
- DE Purong. Study on calculation method of creep settlement of high fill [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023.
- [20] LAMBE W T. Stress path method[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1967, 93(6): 309-331. DOI: 10.1061/jsfeaq.0001058.
- [21] 丁祖德, 汪伟伟, 文锦诚, 等. 考虑开挖应力路径的浅埋偏压隧道施工顺序探讨[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2020, 45(6): 140-148. DOI: 10.16112/j.cnki.53-1223/n.2020.06.472.
- DING Zude, WANG Weiwei, WEN Jincheng, et al. A study on construction sequence of shallow buried bias tunnel considering excavation stress path[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 45(6): 140-148. DOI: 10.16112/j.cnki.53-1223/n.2020.06.472.
- [22] 马豪豪. 公路地基沉降计算方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- MA Haohao. Research on the calculation method to the settlement of highway's subgrade[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [23] 姚仰平, 车力文, 祁生钧, 等. 高填方地基蠕变沉降计算方法研究[J]. 工业建筑, 2016, 46(9): 25-31. DOI: 10.13204/j.gyjz201609007.
- YAO Yangping, CHE Liwen, QI Shengjun, et al. Study of creep settlement computation methods for high embankments [J]. Industrial Construction, 2016, 46(9): 25-31. DOI: 10.13204/j.gyjz201609007.
- [24] 姚仰平, 刘林, 王琳, 等. 高填方地基的蠕变沉降计算方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 154-158. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.026.
- YAO Yangping, LIU Lin, WANG Lin, et al. Calculation method of creep settlement of high fill foundation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(sup 1): 154-158. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.026.
- [25] 王盛源, 关锦荷, 蒋雪琴. 饱和黏土微粒结构及其工程特性研究[J]. 水运工程, 1999(5): 3-7.
- WANG Shengyuan, GUAN Jinhe, JIANG Xueqin. Micro structure of saturated clay and its engineering characteristics[J]. Port & Waterway Engineering, 1999(5): 3-7.
- [26] 陈宗基, 周思梦. 关于岩石变形的基本偏微分方程[J]. 岩石力学与工程学报, 1984(1): 10-22.
- CHEN Zongji, ZHOU Simeng. The basic partial differential equation of rock deformation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1984(1): 10-22.
- [27] WANG Y L, WANG Y. Prediction of the soft roadbed deformation based on a creep damage model [C]// ICCTP 2009. Reston: American Society of Civil Engineers, 2009. DOI: 10.1061/41064(358)323.
- [28] 姚仰平, 祁生钧, 车力文. 高填方地基工后沉降计算[J]. 水力发电学报, 2016, 35(3): 1-10. DOI: 10.11660/slfdbx.20160301.
- YAO Yangping, QI Shengjun, CHE Liwen. Computational method of post-construction settlement for high-fill embankments [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(3): 1-10. DOI: 10.11660/slfdbx.20160301.
- [29] 张磊. 拓宽路基变形数值分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- ZHANG Lei. Numerical analysis the subgrade deformation of subgrade widening [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [30] 赵秀绍, 饶江龙, 陈子溪, 等. 全风化千枚岩复合改良土试验研究及路基沉降数值分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(2): 554-564. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.20220326.
- ZHAO Xiushao, RAO Jianglong, CHEN Zixi, et al. Experimental study on fully weathered phyllite composite improved soil and numerical analysis of subgrade settlement [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(2): 554-564. DOI: 10.19713/

- j.cnki.43-1423/u.t20220326.
- [31] 王忠昶, 李亚洲, 白海峰. 地下水开采引起铁路路基沉降的数值分析[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(7): 707-712. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.2017.07.007.
- WANG Zhongchang, LI Yazhou, BAI Haifeng. Numerical analysis of railway subgrade settlement caused by groundwater exploitation [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2017, 36(7): 707-712. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.2017.07.007.
- [32] 林乐彬, 刘寒冰, 苏志满, 等. 拓宽加载对旧路基附加沉降影响数值分析[J]. 公路交通科技, 2008(10): 41-44. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2008.10.010.
- LIN Lebin, LIU Hanbing, SU Zhiman, et al. Numerical analysis of additional settlement in existing roadbed produced by roadbed widening [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008(10): 41-44. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2008.10.010.
- [33] YAO Yangping, FENG Xing, HUANG Xiang, et al. Application of UH model to finite element analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 237-245.
- [34] 中华人民共和国交通运输部. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specifications for design of highway subgrades: JTG D30—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015.
- [35] 邢启军, 朱学文, 刘金年. 浅谈工后容许不均匀沉降指标及其在高等级公路的研究[J]. 黑龙江交通科技, 2003, 26(3): 21-22. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2003.03.054.
- XING Qijun, ZHU Xuewen, LIU Jinnian. Discussion on allowable differential settlement index after construction and its research in high-grade highway [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2003, 26(3): 21-22. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2003.03.054.
- [36] 董海, 王末顺, 张宇. 高等级公路容许工后不均匀沉降指标的研究[J]. 森林工程, 2002, 18(2): 53-54. DOI: 10.16270/j.cnki.slgc.2002.02.026.
- DONG Hai, WANG Moshun, ZHANG Yu. Study on the uneven subsidence indexes after road construction [J]. Forest Engineering, 2002, 18(2): 53-54. DOI: 10.16270/j.cnki.slgc.2002.02.026.
- [37] 周虎鑫, 陈荣生. 高等级公路工后不均匀沉降指标研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 1996, 26(1): 54-56.
- ZHOU Huxin, CHEN Rongsheng. Research on differential settlements on construction of pavement over soft soil foundation [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 1996, 26(1): 54-56.
- [38] 章定文. 软土地基上高速公路扩建工程变形特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- ZHANG Dingwen. Research on the deformation features of widening of highway on soft ground [D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
- [39] 王江红. G320(衢州段)改扩建公路路基差异沉降特性与控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- WANG Jianghong. Study on differential settlement characteristics and control technology of G320 (Quzhou section) highway subgrade reconstruction and expansion [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [40] 吴跃东, 张超, 钟光强. 高速公路软基拼宽段差异沉降控制研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 652-655.
- WU Yuedong, ZHANG Chao, ZHONG Guangqiang. Control of differential settlement of road widening of expressways on soft soil foundation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(sup 2): 652-655.
- [41] 赵全胜, 赵冠舒, 张春会, 等. 京石高速公路拓宽沉降控制标准[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2012, 31(1): 69-72. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2012.01.017.
- ZHAO Quansheng, ZHAO Guanshu, ZHANG Chunhui, et al. Threshold of settlement control for widened Jing-Shi embankments [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2012, 31(1): 69-72. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2012.01.017.
- [42] 韦锡望. 高速公路改扩建路基沉降标准研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- WEI Xiwang. Research on control criterion of subgrade settlement on expressway widening [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [43] 王珂. 高速公路改扩建工程新旧路基差异沉降发生模式与控制标准研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- WANG Ke. Research on deformation behavior and control criterion of differential settlement in express highway widening project [D]. Ji'nan: Shandong University, 2018.
- [44] 翁效林. 高速公路拓宽路基差异沉降控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- WENG Xiaolin. Study on differential settlement control technology of expressway widening subgrade [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [45] 张军辉. 软土地基上高速公路加宽变形特性及差异沉降控制标准研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- ZHANG Junhui. Research on deformation behavior and

- differential settlement limitation of expressway widening on soft soil foundation [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [46] 高志伟. 基于目标的山区高速公路差异沉降主动控制研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- GAO Zhiwei. Study of initiative control of highway differential settlement considering goal in mountainous area[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [47] 傅珍. 高速公路拓宽工程路基差异沉降及控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- FU Zhen. Study on the differential settlement and controlling technology of expressway widening subgrade [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [48] 叶永城, 李思清, 马鹏真. 佛开高速公路单侧拓宽工程差异沉降控制标准研究[J]. 中外公路, 2013, 33(5): 1-4. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2013.05.039.
- YE Yongcheng, LI Siqing, MA Pengzhen. Study on differential settlement control standard of unilateral widening project of Fokai expressway [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(5): 1-4. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2013.05.039.
- [49] 杨涛, 李磊, 李国维. 公路双侧拓宽差异沉降控制标准研究[J]. 公路交通科技, 2014, 31(5): 15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.05.003.
- YANG Tao, LI Lei, LI Guowei. Research on differential settlement control standard for road bilateral widening project [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(5): 15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.05.003.
- [50] 丁锬. 潼宝高速公路改扩建新旧路基差异沉降数值模拟分析[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- DING Kun. Numerical simulation and analysis of differential settlement in Tongbao express highway widening projects [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [51] 赖军, 朱宏伟. 拓宽路基稳定性及变形特性的影响因素分析[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 33-38. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.04.008.
- LAI Jun, ZHU Hongwei. The analysis of widening roadbed stability and deformation characteristics influence factors [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(4): 33-38. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.04.008.
- [52] 傅珍, 王选仓, 陈星光, 等. 拓宽路基差异沉降特性和影响因素[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 54-57. DOI: 10.3321/j.issn: 1671-1637.2007.01.012.
- FU Zhen, WANG Xuancang, CHEN Xingguang, et al. Differential settlement characteristics and influencing factors of widening subgrade[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 54-57. DOI: 10.3321/j.issn: 1671-1637.2007.01.012.
- [53] 沈国印, 李修忠. 高速公路拓宽工程新老路基差异沉降的数值模拟[J]. 公路, 2012, 57(9): 9-14. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2012.09.003.
- SHEN Guoyin, LI Xiuzhong. Numerical simulation of differential settlement between new and existing embankment in widening of expressway [J]. Highway, 2012, 57(9): 9-14. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2012.09.003.
- [54] 郑勇. 旧路拓宽工程新老路基差异沉降分析及工程应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- ZHENG Yong. Analysis and engineering application of differential settlement between old and new roadbed widening projects [D]. Changsha: Hunan University, 2018.
- [55] 刘金龙, 张勇, 陈陆望, 等. 路基拓宽工程的基本特性分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2159-2163. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.07.017.
- LIU Jinlong, ZHANG Yong, CHEN Luwang, et al. Basic characters of road widening engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2159-2163. DOI: 10.16285/j.rsm.2010.07.017.
- [56] 任海铭. 永古高速公路旧路拓宽路基差异沉降处治技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- REN Haiming. Study on differential settlement treatment technology of widening subgrade of old road of Yonggu expressway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [57] LIU J R, WANG K, CUI S P, et al. Influence of subgrade splicing mode and width on differential settlement of pavement subgrade [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719(3): 032066. DOI: 10.1088/1755-1315/719/3/032066.
- [58] 聂鹏飞, 丁亚碧, 赵兵, 等. 高速公路改扩建工程地基拓宽段力学响应分析[J]. 公路, 2019, 64(2): 39-44.
- NIE Pengfei, DING Yabi, ZHAO Bing, et al. Mechanics response analysis of subgrade widening section for expressway reconstruction project [J]. Highway, 2019, 64(2): 39-44.
- [59] 宋文佳. 高速公路拓宽路基差异沉降特性与控制措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- SONG Wenjia. Study on differential settlement characteristics and control measures of expressway widening subgrade [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [60] 李刚, 郭艳玲. 高速公路改扩建新旧路基差异沉降影响因素分析[J]. 公路交通科技, 2021, 38(7): 22-28. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.07.004.
- LI Gang, GUO Yanling. Analysis on influencing factors of differential settlement of new and old subgrade in expressway reconstruction and extension [J]. Journal of

- Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(7): 22-28. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.07.004.
- [61] 王刚. 镇大公路镇江段拓宽差异性沉降数值模拟研究及应对措施分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
WANG Gang. Numerical simulation study on differential settlement of widening of Zhenjiang section of Zhen-Da highway and analysis of countermeasures [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [62] 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. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2018.1172.
JIA Baoxin, LIU Fengpu, ZHAO Liang, et al. Influential factors analysis of the new and old roadbed on the differential settlements due to the highway reconstruction and extension [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(1): 67-72. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2018.1172.
- [63] 叶观宝, 葛敬文, 许言, 等. 拓宽方式对软土路基工程特性影响的离心模型试验[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(3): 112-117. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201027.
YE Guanbao, GE Jingwen, XU Yan, et al. Centrifugal test on influence of widening styles on the engineering characteristics of soft soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 112-117. DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202201027.
- [64] 胡志文. 高速公路拓宽工程路基差异沉降分析与控制技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
HU Zhiwen. Analysis and controlling technology study on the differential settlement of subgrade in expressway widening project [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [65] 张梅意. 改扩建公路路基填料差异性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
ZHANG Meiyi. Study on the difference of subgrade filler in reconstruction and expansion of highway [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [66] 吴福宝. 厦沙高速高填方路堤工后沉降监测及数值分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(19): 267-271. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.19.042.
WU Fubao. Monitoring and numerical analysis of post-construction settlement of high-filled embankment of Xiasha expressway [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(19): 267-271. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2018.19.042.
- [67] 夏英志, 程玉. 高速公路高填方路堤差异沉降特性研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 268-273. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.04.048.
XIA Yingzhi, CHENG Yu. Study on differential settlement characteristics of high fill embankment of expressway [J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 268-273. DOI: 10.19782/j.cnki.1674-0610.2019.04.048.
- [68] 王才进, 武猛, 杨洋, 等. 基于CPTU测试的高速公路扩建地基软土参数空间变异性研究[J/OL]. 中国公路学报, 2023: 1-21 [2023-12-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20230626.1550.002.html>.
WANG Caijin, WU Meng, YANG Yang, et al. Study on spatial variability of soft soil parameters for expressway expansion foundation based on CPTU test [J/OL]. China Journal of Highway and Transport, 2023: 1-21 [2023-12-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1313.U.20230626.1550.002.html>.
- [69] 王法雨. 高速公路拓宽工程新老路基差异沉降分析[J]. 中外公路, 2011, 31(5): 43-45. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2011.05.016.
WANG Fayu. Differential settlement analysis of new and old subgrade in expressway widening project [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(5): 43-45. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2011.05.016.
- [70] 张永清. 山区高速公路路基差异沉降特性与控制措施研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
ZHANG Yongqing. Study on the differential settlement characteristic and controlling measure of expressway in mountain area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [71] 彭勃, 杨建永, 温树杰, 等. 静力压实不同厚度红砂岩土变形特征试验研究[J]. 建筑技术, 2016, 47(5): 433-436. DOI: 10.13731/j.issn.1000-4726.2016.05.012.
PENG Bo, YANG Jianyong, WEN Shujie, et al. Experimental research on static compaction deformation characteristics of different thickness red sandstone soil [J]. Architecture Technology, 2016, 47(5): 433-436. DOI: 10.13731/j.issn.1000-4726.2016.05.012.
- [72] 彭勃, 杨建永, 温树杰, 等. 静力压实不同含水率红砂岩粗粒土能耗规律试验研究[J]. 江西理工大学学报, 2015, 36(5): 28-33. DOI: 10.13265/j.cnki.jxlgdxxb.2015.05.006.
PENG Bo, YANG Jianyong, WEN Shujie, et al. Experimental study of energy evolution of coarse-grained red sandstone soil under static loading conditions [J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology, 2015, 36(5): 28-33. DOI: 10.13265/j.cnki.jxlgdxxb.2015.05.006.
- [73] 唐秀明, 王春涛. 振动压实下海砂路基承载力特性研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013, 9(7): 129-131, 187.
TANG Xiuming, WANG Chuntao. Study on bearing capacity characteristics of sea sand subgrade under vibration compaction [J]. Journal of Highway and

- Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2013, 9(7): 129-131, 187.
- [74] 闫丛军, 杨士敏. 填石路基振动压实试验[J]. 筑路机械与施工机械化, 2003, 20(5): 8-9. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2003.05.002.
- YAN Congjun, YANG Shimin. Vibratory compaction experiment of roadbed filled with stone [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2003, 20(5): 8-9. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2003.05.002.
- [75] 阚志涛. 振动压路机的压实施工参数与压实工艺研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- KAN Zhitao. Study on compaction construction parameters and compaction technology of vibratory roller [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [76] 赵婉. 强夯法在处理山区回填土地基中的应用研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.
- ZHAO Wan. Research on the application of dynamic compaction method in the treatment of mountainous backfill soil [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.
- [77] 吴迪. 强夯处理在公路工程路基施工中的应用研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2018.
- WU Di. Study on dynamic compaction in roadbed construction of arterial road engineering [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2018.
- [78] 倪宏革, 李璞晟, 李桂花. 不同填料强夯法填筑高路堤试验[J]. 公路交通科技, 2012, 29(9): 30-37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.09.006.
- NI Hongge, LI Pusheng, LI Guihua. Experiment of dynamic compaction on high embankment with different soils [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(9): 30-37. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.09.006.
- [79] 翁效林, 王玮, 刘保健. 湿陷性黄土拓宽路基变形特性及强夯法处治效应模型试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(2): 17-22. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2011.02.004.
- WENG Xiaolin, WANG Wei, LIU Baojian. Model test on deformation characteristics of widening collapsible loess roadbed and dynamic compaction method treatment effect [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(2): 17-22. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2011.02.004.
- [80] 欧阳继业. 软土地区新旧路基差异沉降机理及衔接控制技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
- OUYANG Jiye. Study on differential settlement mechanism and connection control technology of new and old subgrades in soft soil area [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [81] 杨世基. 冲击压实技术在路基工程中的应用[J]. 公路, 1999(7): 1-5.
- YANG Shiji. Application of impact compaction technology in subgrade engineering [J]. Highway, 1999(7): 1-5.
- [82] 宋修广, 李进, 于一凡, 等. 冲击碾压法快速处置粉土路基的应用研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(2): 41-47. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2017.02.006.
- SONG Xiuguang, LI Jin, YU Yifan, et al. Application study of impact roller compaction method to strengthen silt subgrade [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2017, 34(2): 41-47. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2017.02.006.
- [83] 陈旭. 冲击压实技术在机场场道地基工程中的应用[J]. 人民长江, 2003, 34(3): 39-40. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2003.03.026.
- CHEN Xu. Application of impact compaction technology in airport roadway foundation engineering [J]. Yangtze River, 2003, 34(3): 39-40. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2003.03.026.
- [84] 崔武文. 冲击压实工艺和传统压实工艺在高速公路路基加固中的对比研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- CUI Wuwen. The comparative analysis of compactive technique and traditional compact technique in subgrade compact of the highway construction [D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [85] ZHANG J H, LIU L Y, YANG H. An overview of intelligent construction and maintenance technology for highway subgrade engineering [J]. Intelligent Transportation Infrastructure, 2023, 2: liad019. DOI: 10.1093/iti/liad019.
- [86] 叶阳升, 朱宏伟, 尧俊凯, 等. 高速铁路路基振动压实理论与智能压实技术综述[J]. 中国铁道科学, 2021, 42(5): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2021.05.01.
- YE Yangsheng, ZHU Hongwei, YAO Junkai, et al. Review on vibration compaction theory and intelligent compaction technology of high-speed railway subgrade [J]. China Railway Science, 2021, 42(5): 1-11. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2021.05.01.
- [87] ZHANG JIALING, XU GUANGHUI, CAI YING. Application of continuous compaction technology in the quality control and acceptance of high-speed railway subgrade [J]. Journal of Southwest Jiaotong University (English Edition), 2010, 18(3): 196-200.
- [88] 马涛, 马源, 黄晓明. 基于多元非线性回归的智能压实关键参数最优解[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(7): 2067-2077. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgbx.20211010.
- MA Tao, MA Yuan, HUANG Xiaoming. Optimal combination of key parameters of intelligent compaction

- based on multiple nonlinear regression [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(7): 2067–2077. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211010.
- [89] 陈晓斌, 谢康, 尧俊凯, 等. 基于能量最小原则的高铁填料压实过程振动参数优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(9): 3731–3742. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.09.032.
- CHEN Xiaobin, XIE Kang, YAO Junkai, et al. Optimization of vibration parameters of high-speed railway filling material compaction process based on principle of minimum energy [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(9): 3731–3742. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.09.032.
- [90] 柴振超. 高速公路改扩建工程软土地基处治技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2009.
- CHAI Zhenchao. Research on the technology of soft foundation cure in highway expansion project [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [91] 刘涛, 张军, 黄博. 高液限黏土路基加宽的有限元分析[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 220–225, 265. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2018.05.042.
- LIU Tao, ZHANG Jun, HUANG Bo. Finite element analysis for embankment-widened made of high liquid limit clay [J]. Highway Engineering, 2018, 43(5): 220–225, 265. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0610.2018.05.042.
- [92] 高翔. 高速公路新老路基相互作用分析与处理技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
- GAO Xiang. Study on interaction analysis and treatment technology of new and old subgrade of expressway [D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [93] 陈星光. 高速公路扩建工程差异沉降控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- CHEN Xingguang. Study on differential settlement control technology of expressway expansion project [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [94] 沈国印. 高速公路新老路基拼接的台阶开挖效果分析[J]. 公路, 2012, 57(7): 49–53. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2012.07.010.
- SHEN Guoyin. Analysis of effect of step excavation in splicing between new and existing embankment of expressway [J]. Highway, 2012, 57(7): 49–53. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2012.07.010.
- [95] 孙日双, 祝玉巍. 台阶开挖在路基拼接技术中的应用研究[J]. 山东交通科技, 2015(4): 27–29, 40.
- SUN Rishuang, ZHU Yuwei. The application research of ench excavation in the embankment splicing technology [J]. Shandong Transportation Technology, 2015(4): 27–29, 40.
- [96] 何振华. 高速公路改扩建黏土路基加宽差异沉降控制技术[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- HE Zhenhua. Study on differential settlement control technology of widened clay roadbed for expressway reconstruction and expansion [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [97] 刘春虹, 肖朝昀, 王建华, 等. 土工织物加固软土路堤的有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊2): 325–328. DOI: 10.16285/j.rsm.2004.s2.067.
- LIU Chunhong, XIAO Zhaoyun, WANG Jianhua, et al. Finite element analysis of geotextile strengthening soft soil embankment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(sup 2): 325–328. DOI: 10.16285/j.rsm.2004.s2.067.
- [98] 王协群, 安骏勇, 王钊. 土工合成材料在沥青路面的应用及其设计[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1093–1098. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2004.07.019.
- WANG Xiequn, AN Junyong, WANG Zhao. Application of geosynthetics to asphalt pavement and its design [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1093–1098. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2004.07.019.
- [99] WANG Y M, YI H, LI Q Z. Model tests on working performance of geogrid reinforcement influenced by differential settlement [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255–260: 3376–3381. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.255-260.3376.
- [100] 羊晔, 刘松玉, 邓永锋. 加筋路基处治不均匀沉降模型试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 703–706, 711. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.03.015.
- YANG Ye, LIU Songyu, DENG Yongfeng. Effect of reinforced subgrade on differential settlement by model test research [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 703–706, 711. DOI: 10.16285/j.rsm.2009.03.015.
- [101] MIAO L, WANG F, HAN J, et al. Benefits of geosynthetic reinforcement in widening of embankments subjected to foundation differential settlement [J]. Geosynthetics International, 2014, 21(5): 321–332. DOI: 10.1680/gein.14.00019.
- [102] 汪益敏, 李庆臻, 高水琴. 差异沉降对土工格栅加筋路堤工作性能影响的试验研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 68–74. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2011.09.012.
- WANG Yimin, LI Qingzhen, GAO Shuiqin. Experimental investigation into effect of differential settlement on working performance of geogrid reinforced embankment [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(9): 68–74. DOI: 10.3969/j.issn.1000-565X.2011.09.012.
- [103] SHEN Z, LI H M, WEI Y X, et al. Centrifugal model test of embankment widening with geogrid treatment

- technique[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(23): 2484. DOI: 10.1007/s12517-021-08844-z.
- [104]傅珍,王选仓,李宏志,等.高速公路拓宽路基差异沉降[J].*交通运输工程学报*, 2010, 10(6): 25-31. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2010.06.005.
- FU Zhen, WANG Xuancang, LI Hongzhi, et al. Differential settlement of widening subgrade for expressway[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2010, 10(6): 25-31. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2010.06.005.
- [105]晏莉,阳军生,高燕希,等.土工合成材料处治老路路基拓宽的数值分析[J].*岩石力学与工程学报*, 2006, 25(8): 1670-1675. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2006.08.023.
- YAN Li, YANG Junsheng, GAO Yanxi, et al. Numerical analysis of geosynthetics treatment in old road widening[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(8): 1670-1675. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-6915.2006.08.023.
- [106]杨涛,杨锦忠,石磊,等.土工格栅加筋拓宽路堤有限元分析[J].*土木工程学报*, 2011, 44(增刊2): 37-40. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.s2.024.
- YANG Tao, YANG Jinzhong, SHI Lei, et al. Finite element analysis of geogrid reinforced widening embankment[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(sup 2): 37-40. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2011.s2.024.
- [107]汪益敏,闫岑,于恒,等.静载作用下土工格栅加筋拓宽路堤土中应力特征试验研究[J].*岩土力学*, 2018, 39(增刊1): 311-317. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1993.
- WANG Yimin, YAN Cen, YU Heng, et al. Experimental study on stress characteristics of geogrid reinforced embankment soil under static load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(sup 1): 311-317. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1993.
- [108]AHMAD Hussein, MAHBOUBI Ahmad, NOORZAD Ali, 等.包裹式土工格栅-砂土相互作用对条形基础承载力-沉降特性的影响研究[J].*岩土力学*, 2022, 43(9): 2550-2567. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.00113.
- AHMAD Hussein, MAHBOUBI Ahmad, NOORZAD Ali, et al. Investigation of the influence of interaction of wraparound geogrid-sand on load bearing-settlement behavior of strip footing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(9): 2550-2567. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.00113.
- [109]翁效林,张留俊,李林涛,等.拓宽路基差异沉降控制技术模型试验研究[J].*岩土工程学报*, 2011, 33(1): 159-164.
- WENG Xiaolin, ZHANG Liujun, LI Lintao, et al. Model tests on control techniques for differential settlement of road widening[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33(1): 159-164.
- [110]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 method on highway expansion project based on partial embankment filling method[D]. Ji'nan: Shandong University, 2021.
- [111]观祖保,杨挺,吴巨贵,等.土工格栅处治老路拼接的加筋效应分析[J].*中国公路学报*, 2017, 30(6): 215-222. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3897.2017.06.004.
- GUAN Zubao, YANG Ting, WU Jugui, et al. Reinforced-effect analysis of geogrid treatment in old road widening[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(6): 215-222. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3897.2017.06.004.
- [112]胡卫国,何桥敏.土工格栅在填方路堤中的加筋作用试验研究[J].*中外公路*, 2018, 38(1): 38-42. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.01.009.
- HU Weiguo, HE Qiaomin. Experimental study on reinforcement effect of geogrid in filled embankment[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2018, 38(1): 38-42. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.01.009.
- [113]郑俊杰,周燕君,曹文昭,等.不同网孔形状格栅加筋土界面特性试验研究[J].*西南交通大学学报*, 2017, 52(3): 482-488. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.03.007.
- ZHENG Junjie, ZHOU Yanjun, CAO Wenzhao, et al. Experimental study of interface behavior of geogrids with different aperture shapes[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, 52(3): 482-488. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2017.03.007.
- [114]曹文昭,郑俊杰,周燕君.双向和三向土工格栅筋土界面特性对比试验研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(1): 109-116. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.01.012.
- CAO Wenzhao, ZHENG Junjie, ZHOU Yanjun. Comparative experimental investigation of geogrid-soil interface behavior of biaxial and triaxial geogrid[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(1): 109-116. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.01.012.
- [115]唐晓松,郑颖人,王永甫,等.关于土工格栅合理网孔尺寸的研究[J].*岩土力学*, 2017, 38(6): 1583-1588. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.006.
- TANG Xiaosong, ZHENG Yingren, WANG Yongfu, et al. Study on the reasonable size of geo-grid meshes[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(6): 1583-1588. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.006.
- [116]郭铭倍,宋玲,刘杰,等.基于数值分析的土工格栅加筋陡坡路堤优化设计研究[J].*中外公路*, 2021,

- 41(5): 11-17. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.003.
- GUO Mingbei, SONG Ling, LIU Jie, et al. Study on optimization design of geogrid reinforced steep slope embankment based on numerical analysis [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5): 11-17. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2021.05.003.
- [117] 雷金昌. 土工格栅在道路改扩建工程中的应用研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- LEI Jinchang. Study on application of geogrid in road reconstruction and expansion project [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2023.
- [118] 刘铭杰, 彭丽云. 改良粉土在高速公路路基中的适用性研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(增刊2): 809-814.
- LIU Mingjie, PENG Liyun. Study on the applicability of improved silt in expressway subgrade [J]. Building Structure, 2020, 50(sup 2): 809-814.
- [119] 张莎莎, 谢山杰, 杨晓华, 等. 火山灰改良粗粒硫酸盐渍土路基填料及其作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(3): 588-594. DOI: 10.11779/CJGE201903023.
- ZHANG Shasha, XIE Shanjie, YANG Xiaohua, et al. Action mechanism of coarse particle sulfate soil subgrade modified by volcanic ash [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(3): 588-594. DOI: 10.11779/CJGE201903023.
- [120] 杜耀辉, 杨晓华, 王明皎. 泥质软岩弃渣及其改良填料路基沉降规律试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2018, 38(3): 18-25. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8879.2018.03.003.
- DU Yaohui, YANG Xiaohua, WANG Mingjiao. Experimental on settlement of subgrade filled by improved argillaceous soft rock [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018, 38(3): 18-25. DOI: 10.3969/j.issn.1671-8879.2018.03.003.
- [121] 陆许峰. 长余高速公路拓宽路基差异沉降机理与控制标准研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- LU Xufeng. Study on differential settlement mechanism and control standard of widening subgrade of Changyu expressway [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [122] 曹新玲. 高速公路加宽改扩建关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- CAO Xinling. Research on key technology of highway extension project [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [123] 孙文. 高速公路路基拓宽泡沫轻质混凝土离心模型试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- SUN Wen. Centrifugal model test of foamed lightweight concrete for widening expressway subgrade [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [124] 张振, 刘洪伟, 叶观宝, 等. 气泡轻质土高铁拓宽路基性能离心模型试验研究[J]. 地基处理, 2022, 4(3): 220-225.
- ZHANG Zhen, LIU Hongwei, YE Guanbao, et al. Centrifugal model test research on the performance of high-speed rail widening subgrade with bubble light soil [J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(3): 220-225.
- [125] 张亚林. 湖区公路改扩建工程路基变形特性及填料改良处治技术研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- ZHANG Yalin. The research on deformation characteristics and filler amelioration treatment technology of reconstruction and expansion of highwaysubgrade in lake region [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [126] ZHANG J H, LI F, ZENG L, et al. Effect of cushion and cover on moisture distribution in clay embankments in Southern China [J]. Journal of Central South University, 2020, 27(7): 1893-1906. DOI: 10.1007/s11771-020-4418-7.
- [127] 邓云潮. 高速公路拓宽路基综合防排水系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- DENG Yunchao. Study on integrated drainage system in road reconstruction and extension widening [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [128] 王珊珊, 李丽慧, 胡瑞林, 等. 动力排水固结法加固吹填黏性土的模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 906-912. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.06.015.
- WANG Shanshan, LI Lihui, HU Ruilin, et al. Research on indoor experimental model for dynamic consolidation of dredged clay [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 906-912. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2010.06.015.
- [129] 姚永胜, 张军辉, 李崛, 等. 江西省昌樟高速公路改扩建工程老路基渗水处治方法研究[J]. 中外公路, 2018, 38(3): 14-18. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.03.004.
- YAO Yongsheng, ZHANG Junhui, LI Jue, et al. Research on treatment method of seepage in old subgrade slope reconstruction project of Chang-Zhang highway in Jiangxi Province [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(3): 14-18. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2018.03.004.

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:吴高桥)