

新旧道路衔接处差异沉降控制技术研究

——基于一种新型应力拉筋复合结构的力学性能与工程应用分析

罗丹 林雄

中铁二十二局集团第五工程有限公司, 重庆 400711

[摘要]随着我国交通基础设施建设的飞速发展,既有道路的改扩建工程日益增多。新旧路基衔接处的差异沉降问题一直是道路工程领域的难点和痛点,它直接导致路面产生纵向裂缝、错台等病害,严重影响行车安全、舒适性和道路使用寿命。传统采用土工格栅等加筋材料的方法,在长期荷载作用下仍难以有效抵抗差异变形。本篇文章针对上述技术瓶颈,深入分析了一种新型新旧道路路面衔接结构。该结构创新性地引入了一种可旋转、带弹性限位件的应力拉筋系统,与传统的路基辅助材料层(钢塑格栅、防渗土工布)协同工作,形成了一套刚柔并济、主动约束与被动加固相结合的复合加固体系。本篇文章详细阐述了该衔接结构的构造组成、核心部件应力拉筋的工作机理,并通过力学分析揭示了其如何通过“锚固锁定应力传递”机制有效抑制新旧路基的相对位移。同时,本篇文章系统梳理了该结构的施工工艺流程,并从抗分离、抗裂性能、施工便捷性、长期耐久性等方面与传统技术进行了对比分析。研究结果表明,该新型衔接结构能够显著提升新旧路基的整体性和协同工作能力,有效控制差异沉降,为解决道路改扩建工程中的关键技术难题提供了可靠的技术方案,具有广阔的推广应用前景。

[关键词]道路改扩建;新旧路基衔接;差异沉降;应力拉筋;土工格栅;复合加固;路面裂缝

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18007

中图分类号: TU41

文献标识码: A

Research on Differential Settlement Control Technology at the Junction of New and Old Roads — Mechanical Properties and Engineering Application Analysis Based on a New Type of Stress Tension Reinforcement Composite Structure

LUO Dan; LIN Xiong

Fifth Engineering Co., Ltd. of China Railway 22nd Bureau Group Corporation Limited, Chongqing, 400711, China

Abstract: With the rapid development of transportation infrastructure construction in China, the number of renovation and expansion projects on existing roads is increasing. The differential settlement problem at the junction of old and new roadbeds has always been a difficult and painful point in the field of road engineering. It directly leads to longitudinal cracks, misalignment and other diseases on the road surface, seriously affecting driving safety, comfort and road service life. The traditional method of using reinforced materials such as geogrids is still difficult to effectively resist differential deformation under long-term loads. This article provides an in-depth analysis of a new type of road surface connection structure for new and old roads, targeting the aforementioned technical bottlenecks. This structure innovatively introduces a stress reinforcement system that is rotatable and equipped with elastic limiters, which works in conjunction with traditional subgrade auxiliary material layers (steel plastic grids, anti-seepage geotextiles) to form a composite reinforcement system that combines rigidity and flexibility, active restraint, and passive reinforcement. This article elaborates on the structural composition of the connecting structure, the working mechanism of the core component stress reinforcement, and reveals through mechanical analysis how it effectively suppresses the relative displacement of the new and old roadbeds through the mechanism of "anchoring and locking stress transmission". At the same time, this article systematically reviews the construction process of the structure and compares it with traditional techniques in terms of anti separation, crack resistance, construction convenience, and long-term durability. The research results indicate that the new connection structure can significantly improve the overall integrity and collaborative working ability of the new and old roadbeds, effectively control differential settlement, and provide a reliable technical solution for solving key technical problems in road reconstruction and expansion projects, with broad prospects for promotion and application.

Keywords: road renovation and expansion; connection between new and old roadbeds; differential settlement; stress reinforcement; geogrid; composite reinforcement; road crack

1 概述

1.1 研究背景与意义

进入 21 世纪以来,中国公路交通网络建设取得了举

世瞩目的成就,路网密度和通达深度持续提升。然而,随着社会经济的快速发展和机动车保有量的激增,早期建设的许多道路已无法满足日益增长的交通需求,其通行能力、

服务水平均面临严峻挑战。因此,对既有道路进行拓宽改造,成为提升路网整体效能、缓解交通压力的主要手段。道路改扩建工程相较于新建工程,其技术复杂性更高,尤其是在新旧路基的衔接处理上。

新旧路基由于修建年代、施工工艺、地基条件、固结时间、荷载历史等方面的显著差异,导致其在物理力学性质上存在本质区别。旧路基经过多年的车辆荷载作用和自然固结,其沉降已基本趋于稳定,密实度和承载力较高。而新路基则是在旧路基侧旁填筑而成,其填料性质、压实状态均与旧路基不同,且在自身重力和未来交通荷载作用下,必然会产生新的固结沉降。这种新旧路基之间不可避免的不均匀沉降,即“差异沉降”,是引发路面结构破坏的根本原因。当差异沉降超过路面结构所能承受的极限拉应变时,就会在衔接处产生纵向裂缝,严重时形成错台,不仅破坏了路面的平整度和美观性,更对行车安全构成直接威胁,雨水通过裂缝下渗还会进一步侵蚀路基,加速病害的扩展,形成恶性循环,大大缩短道路的使用寿命。

因此,如何有效控制新旧路基衔接处的差异沉降,增强衔接部位的整体性和抗变形能力,是道路改扩建工程中亟待解决的核心技术问题。研究和开发高效、可靠、经济的新旧路基衔接技术,对于保障改扩建工程质量、延长道路服务年限、降低全生命周期养护成本、提升公众出行体验具有重大的理论价值和现实意义。

1.2 国内外研究现状

针对新旧路基差异沉降问题,国内外学者和工程技术人员进行了大量的研究与实践,形成了多种处理技术。总体上可分为地基处理、路基填筑优化和衔接部位加筋三大类。

在地基处理方面,常采用强夯法、置换法、桩基(如CFG桩、PHC管桩)等方法对新路基下的软弱地基进行加固,以减小新路基自身的总沉降量。这类方法效果显著,但往往成本高昂,施工周期长,且对周边环境的影响较大,适用于地质条件特别差的路段。

在路基填筑优化方面,主要通过选择轻质填料(如泡沫轻质土、EPS块)、控制填筑速率、提高压实标准、设置过渡段等措施来减小新路基的附加应力和不均匀性。轻质填料能有效降低新路基自重,从而减小沉降,但其材料成本相对较高。设置过渡段(如采用台阶式开挖)则旨在实现新旧路基刚度的平顺过渡,缓解应力集中。

在衔接部位加筋方面,应用最为广泛的是铺设土工合成材料,如土工格栅、土工格室、高强度土工布等。其原理是利用筋材的抗拉强度,通过筋土界面摩擦咬合作用,将新路基的部分荷载传递到旧路基,约束新路基的侧向变形,从而提高衔接处的整体稳定性。钢塑格栅因其高抗拉强度、低蠕变、耐腐蚀等优点,成为主流选择。同时,常配合铺设防渗土工布,以防止水分侵入,保持路基土的强度。

然而,实践表明,单纯依赖土工格栅等平面加筋材料仍存在局限性。首先,其加固效果依赖于筋材与土体之间的有效摩擦,若施工中压实不足或界面处理不当,加固效果会大打折扣。其次,土工格栅主要提供二维平面内的约束,对于新旧路基界面可能发生的剪切错动和竖向分离的抵抗能力相对有限。正如本实用新型专利背景技术中指出的,即便采用了钢塑格栅和防渗土工布,路面在使用一年左右仍可能出现裂缝,这说明传统加筋体系在长期循环荷载和复杂应力状态下,其抗分离、抗裂性能仍有待提升。

近年来,一些三维加筋技术和植筋、打设锚杆等主动加固技术也开始被探索。例如,在旧路基中钻孔植入钢筋或型钢,再与新路基填料结合,形成强有力的连接。这类方法能提供更强的抗剪和抗拔能力,但施工工艺复杂,对旧路基结构有一定损伤,且成本较高,难以大规模推广。

1.3 本文研究内容

基于上述背景,本文旨在对一种创新性的新旧道路路面衔接结构进行系统性的理论分析与工程应用研究。该结构在传统路基辅助材料层的基础上,独创性地设计了一种可安装于路堤侧面的“应力拉筋”系统。本文将围绕该结构展开以下几方面的研究:

(1) 结构组成与原理分析:详细介绍该新型衔接结构的各个组成部分,重点剖析核心部件——应力拉筋的构造设计,包括连接盘、旋转套、内杆、弹性限位件等,并阐明其协同工作原理。

(2) 力学机理与性能优势:从力学角度深入分析该结构如何通过应力拉筋的“锚固锁死”机制,实现对新旧路基的主动连接和应力传递,并与传统土工格栅的加固机理进行对比,突出其在抗分离、抗裂方面的独特优势。

(3) 施工工艺与关键技术:系统梳理该衔接结构的完整施工流程,从旧路基台阶开挖、应力拉筋安装定位,到路基辅助材料层铺设、新路基填筑,直至路面层施工,明确各环节的技术要点和质量控制标准。

(4) 综合效益与应用前景:结合技术性能、施工效率、经济成本和长期耐久性等方面,对该新型衔接结构的综合效益进行评价,并探讨其在不同类型道路改扩建工程中的应用前景。

通过以上研究,以期为该新技术的推广应用提供坚实的理论支撑和实践指导,为解决新旧路基差异沉降这一行业难题贡献一份力量。

2 新型新旧道路路面衔接结构构造与原理

2.1 总体结构设计

本实用新型所提出的新旧道路路面衔接结构,是一个多层次、多维度的复合加固体系。其总体构造自下而上主要包括:旧路基(1)、新路基(2)、设置于二者之间的路堤(3)、铺设于路堤(3)之上的路基辅助材料层(4),以及贯穿新旧路基的应力拉筋(6),最终顶部统一铺设路

面层(5)。其整体结构剖面如图1所示。

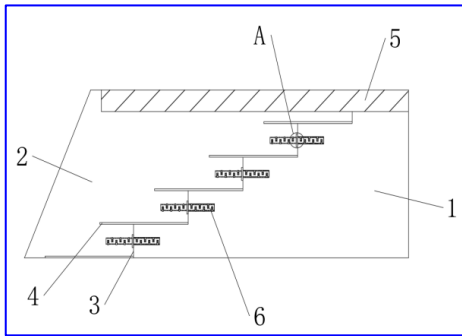


图1 新型新旧道路路面衔接结构主视剖面图

该设计的核心理念在于“刚柔并济，主被动结合”。“柔”体现在路基辅助材料层(4)，它通过大面积的平面约束，协调新旧路基的变形，起到被动加固和过渡作用。“刚”则体现在应力拉筋(6)，它作为一种点状、高强度的连接件，主动将新旧路基“锁死”在一起，直接抵抗二者间的分离和错动趋势。二者协同作用，形成一个整体性强、变形协调的复合路基结构。

2.2 核心部件：应力拉筋的构造与功能

应力拉筋(6)是本衔接结构最关键的创新点，其设计精巧，功能强大。它主要由连接盘(61)、旋转套(62)、内杆(63)以及弹性限位件四部分构成，其结构如图2所示。

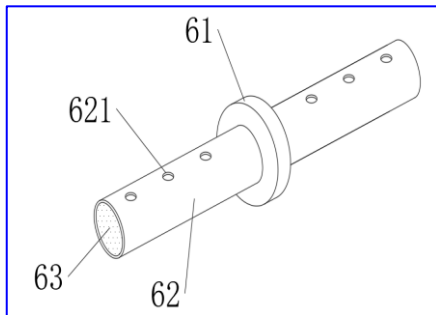


图2 应力拉筋结构图

2.2.1 内杆与连接盘

内杆(63)是应力拉筋的主体承载构件，通常采用高强度钢材制成，以保证其足够的抗拉、抗剪强度。两根内杆(63)对称地固定焊接于一个中央连接盘(61)的两侧，形成一个“H”形或“工”字形的基本骨架。连接盘(61)不仅起到连接和固定两侧内杆的作用，更重要的是，它为旋转套(62)提供了旋转的基准和限位。连接盘(61)两侧开设有环形滑槽，旋转套(62)的内端嵌入该滑槽内，使得旋转套(62)既能绕内杆(63)轴线自由旋转，又不会发生轴向窜动，保证了结构的稳定性和可操作性。

2.2.2 弹性限位件

弹性限位件是实现应力拉筋“锁死”功能的核心执行单元。它由限位块(631)和弹簧(633)组成。在内杆(63)

的杆身上，沿周向和轴向均匀开设有若干个安装孔一(632)。弹簧(633)安装于安装孔一(632)的底部，其一端与孔底固定，另一端则连接着限位块(631)。在自然状态下，弹簧(633)处于压缩或自由状态，具有向外弹出的趋势。限位块(631)的外端部还焊接有若干块防滑块(6311)，这些防滑块(6311)通常采用高硬度合金或硬质塑料制成，其作用是在限位块(631)弹出后，增大其与锚固材料(8)或土体之间的摩擦力和机械咬合力，防止滑移。

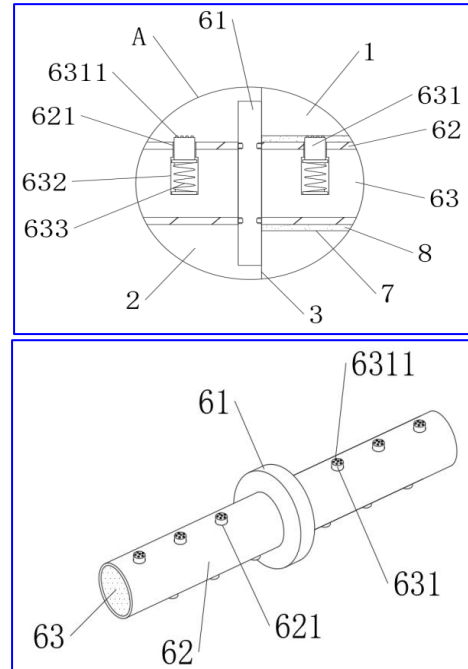


图3 应力拉筋与弹性限位件结合构造图

2.2.3 旋转套

旋转套(62)是一个套设在内杆(63)外部的圆筒状构件，它相当于一个“保险开关”。在旋转套(62)的筒壁上，开设有与内杆(63)上预留孔(632)数量相等且位置可对应的通孔(621)。在初始安装状态下，旋转套(62)被转动至一个特定角度，使其通孔(621)与内杆预留孔(632)完全错开。此时，限位块(631)被旋转套(62)的内壁完全约束在安装孔一(632)内部，弹簧(633)被压缩，整个应力拉筋(6)的外表面是光滑的，没有任何凸起，便于插入路堤预先钻好的(7)中。

2.3 工作原理详解

应力拉筋(6)的工作过程可分为“安装就位”“旋转解锁”“锚固锁死”三个阶段，其工作状态变化如图3和图4所示。

第一阶段：安装就位。施工前，将旋转套(62)旋转至锁定位置，即通孔(621)与旋内杆预留孔(632)错位。此时，应力拉筋(6)整体直径最小，可以轻松地横向插入路堤(3)侧壁预先钻好的安装孔(7)中。

第二阶段：旋转解锁。当应力拉筋（6）被推送到安装孔（7）内的预定位置后，施工人员使用专用工具或直接手动转动旋转套（62）。由于旋转套（62）与连接盘（61）之间通过环形滑槽连接，转动操作十分省力。当旋转套（62）上的通孔（621）与内杆（63）上的预留孔（632）精确对齐时，约束被瞬间解除。

第三阶段：锚固锁死。解除约束后，内杆预留孔（632）内的弹簧（633）迅速释放储存的弹性势能，将限位块（631）及其端部的防滑块（6311）强力弹出。限位块（631）深深地扎入预先灌注在安装孔（7）内壁的、尚未完全凝固的锚固材料（8）层中。限位块（631）的楔入作用，配合防滑块（6311）的机械咬合，使得应力拉筋（6）的一端被牢固地锚固在旧路基的路堤（3）之中。随后，在新路基（2）的填筑过程中，应力拉筋（6）的另一端被完全包裹和压实在新路基填料中。通过这种方式，一根应力拉筋（6）就如同一颗巨大的“铆钉”，将新旧路基紧密地连接成一个整体。

3 力学机理与性能优势分析

3.1 传统土工格栅加固机理的局限性

传统的钢塑格栅加固机理主要基于“准黏聚力”理论。当路基土体受到竖向荷载时，会产生侧向膨胀变形。铺设的格栅通过与土体的摩擦和咬合，为土体提供了一个侧向约束力，相当于给土体施加了一个“围压”，从而提高了土体的抗剪强度和整体刚度。在新旧路基衔接处，格栅横跨新旧路基，能将新路基的部分应力传递给刚度更大的旧路基，起到协调变形、减缓差异沉降的作用。

然而，这种加固方式存在以下局限性：

（1）被动性：格栅的加固作用是在土体发生变形后才被动发挥的，它无法从根本上阻止差异沉降的发生，只能在一定程度上延缓和减小其影响。

（2）二维性：格栅主要提供平面内的约束力，对于新旧路基界面处可能发生的剪切错动和竖向剥离（即“抗分离”能力），其抵抗能力相对较弱。裂缝的产生往往是由于拉应变超过了极限，而格栅对界面直接抗拉的贡献有限。

（3）依赖性：加固效果高度依赖于施工质量，如格栅的张紧度、搭接长度、填料的压实度等。任何一个环节的疏漏都可能导致加固效果大打折扣。

3.2 新型复合结构的协同力学机理

本新型衔接结构通过应力拉筋（6）与路基辅助材料层（4）的协同作用，构建了一个更为强大的力学体系。

3.2.1 应力拉筋的主动锚固与抗剪机理

应力拉筋（6）的力学作用是主动和直接的。一旦安装完成，它就立即成为连接新旧路基的刚性纽带。

抗拉拔作用：当新路基发生沉降，试图与旧路基分离时，埋设在新路基中的内杆（63）会受到巨大的拔出力。这个力通过连接盘（61）传递给另一侧的内杆（63），最终由锚固在旧路基锚固材料（8）中的限位块（631）承担。

限位块（631）的楔入式设计，使其抗拔出能力远超普通的光圆钢筋，能有效抵抗竖向差异沉降。

抗剪切作用：当新旧路基发生水平方向的错动趋势时，应力拉筋（6）相当于一个强大的剪力键。其圆形截面的内杆（63）和坚固的连接盘（61）能够提供强大的抗剪刚度，直接抵抗界面剪切应力，防止路基发生错台破坏。

应力重分布：多根应力拉筋（6）沿道路纵向分布，形成一个空间桁架体系。它们能将新路基的局部集中荷载有效地传递和分散到旧路基的深部稳定区域，避免了应力在衔接界面的过度集中，从而保护了路面结构。

3.2.2 路基辅助材料层的补充与协调作用

路基辅助材料层（4）在此体系中扮演着不可或缺的补充角色。

钢塑格栅：它在应力拉筋（6）之间形成了一个连续的加固平面，弥补了点状加固可能存在的“空白区”。它约束了新旧路基之间广大区域的土体变形，与应力拉筋（6）形成“点面结合”的立体加固网络，使得整个衔接区域的刚度分布更加均匀。

防渗土工布：它的主要功能是防水。通过隔断地表水和地下水向衔接界面的渗透，保持了路基土的含水率稳定，从而确保了土体的强度和应力拉筋（6）与土体之间的摩擦力不被削弱。这对于结构的长期耐久性至关重要。

3.3 性能优势综合对比

相较于传统技术，本新型衔接结构具有以下显著优势：

（1）卓越的抗分离、抗裂性能：应力拉筋的主动锚固机制从根本上解决了新旧路基的分离问题，其强大的抗拉拔能力是传统土工格栅无法比拟的，能从源头上杜绝纵向裂缝的产生。

（2）刚柔并济，变形协调能力强：刚性的应力拉筋保证了连接的可靠性，柔性的土工格栅则允许一定的变形协调，避免了刚性连接可能导致的应力集中和二次破坏，结构体系更加合理。

（3）施工便捷，质量可控：应力拉筋的“旋转解锁”设计，使得安装过程简单快捷，对施工人员的技能要求不高。其锚固效果由机械结构保证，受人为因素影响小，工程质量更容易控制。

（4）长期耐久性好：应力拉筋采用高强度钢材，限位块锚固在混凝土中，整个系统抗腐蚀、抗老化能力强。配合防渗土工布，能有效隔绝水分侵蚀，确保了结构在设计年限内的长期稳定性。

4 施工工艺与关键技术

该新型衔接结构的施工需要遵循严格的工艺流程，以确保其性能得到充分发挥。

4.1 施工准备与旧路基处理

（1）交通组织与场地清理：对施工路段进行交通管制，清除旧路基边坡的植被、浮土等杂物。

(2) 旧路基台阶开挖: 按照设计要求(如 100cm 宽×30cm 高的台阶), 对旧路基边坡进行挖台阶处理, 形成若干个路堤(3)。开挖过程中应尽量减少对旧路基主体的扰动。开挖后对台阶面进行压实, 压实度不低于 95%。

4.2 应力拉筋安装

(1) 钻孔: 在每个路堤(3)的侧面, 按设计间距和位置, 使用钻孔机钻取安装孔(7)。孔径应与应力拉筋(6)的外径相匹配, 孔深需满足锚固长度要求。

(2) 清孔与注浆准备: 用高压风或水清理孔内杂物, 保持孔壁清洁。

(3) 注入混凝土: 向安装孔(7)内注入流动性好、早期强度高的锚固材料(8), 灌注量约为孔深的 2/3 至 3/4。

(4) 插入应力拉筋: 将处于锁定状态的应力拉筋(6)对准安装孔(7), 平稳地推入至设计深度。

(5) 旋转解锁: 立即使用专用扳手或工具转动旋转套(62), 直至通孔(621)与内杆预留孔(632)对齐, 听到或感觉到弹簧弹出的“咔哒”声, 确认限位块(631)已成功嵌入锚固材料中。

(6) 补浆与养护: 对孔口进行补浆, 确保孔内密实无空隙, 并对锚固点进行初步养护。

4.3 路基辅助材料层铺设与新路基填筑

(1) 铺设钢塑格栅: 在路堤(3)顶部及新路基基底, 铺设钢塑格栅。格栅应保持平整、张紧, 其主受力方向(即强度最高的方向)应与道路横断面方向一致, 以最大程度抵抗差异沉降。用 U 型钉将格栅两端固定, 并在新旧路基衔接处打入短锚杆进行锚固。

(2) 铺设防渗土工布: 在钢塑格栅之上覆盖防渗土工布, 搭接宽度需满足规范要求, 确保防水效果。

(3) 新路基填筑: 分层填筑新路基填料, 每层松铺厚度控制在 20~30cm。使用小型压实机具靠近应力拉筋区域进行压实, 避免大型机械碰撞拉筋, 确保压实度达到设计要求。填筑过程中, 应力拉筋(6)被逐层埋入新路基中。

4.4 路面层施工

在新路基填筑完成并经过足够的预压期(或沉降稳定期)后, 按照标准工艺进行基层、底基层和面层的施工。在衔接处的面层施工中, 可考虑铺设玻璃纤维格栅等抗裂材料, 形成双重保险。

5 结论与展望

5.1 结论

本文对一种基于新型应力拉筋的新旧道路路面衔接结构进行了全面的分析。研究表明:

(1) 该结构通过创新性的应力拉筋设计, 实现了对新旧路基的主动、高强度的机械连接, 其“锚固锁死”机制能有效抵抗界面处的拉、剪应力, 从根本上解决了传统

技术难以克服的抗分离、抗裂性能不足的问题。

(2) 应力拉筋与路基辅助材料层(钢塑格栅、防渗土工布)的有机结合, 形成了“点面结合、刚柔并济”的复合加固体系, 能够协同工作, 高效地控制新旧路基的差异沉降, 提升衔接区域的整体稳定性和耐久性。

(3) 该结构设计合理, 施工工艺相对简便, 质量易于控制, 综合性能优越, 为道路改扩建工程提供了一种高效、可靠的技术解决方案, 具有显著的技术经济优势。

5.2 展望

尽管该新型衔接结构优势明显, 但在未来的研究和应用中, 仍有进一步深化的空间:

(1) 精细化设计理论: 可通过数值模拟(如有限元分析)和室内模型试验, 进一步研究应力拉筋的合理布置间距、锚固长度、极限承载力等关键设计参数, 建立更为精确的设计计算方法。

(2) 材料与工艺优化: 可探索使用更高强度的复合材料、耐腐蚀合金等来制造应力拉筋, 以适应更恶劣的工程环境。同时, 研发更高效的自动化安装设备, 进一步提高施工效率。

(3) 长期性能监测: 在实际工程中布置监测设备, 对采用该结构的路段进行长期跟踪观测, 收集沉降、应变、裂缝等数据, 验证其长期性能, 并为后续的技术改进提供依据。

综上所述, 该新型新旧道路路面衔接结构代表了路基加固技术的一个重要发展方向, 随着其理论的不完善和工程实践的积累, 必将在未来的交通基础设施建设中发挥越来越重要的作用。

基金项目: 中铁二十二局集团有限公司科技研究开发计划项目(22-04A)。

[参考文献]

- [1]王铁梦.工程结构裂缝控制[M].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [2]刘松玉,钱国超.公路路基工程中差异沉降研究进展[J].岩土工程学报,2010,32(2):18.
- [3]JTGD302015,公路路基设计规范[S].
- [4]包承纲.土工合成材料在工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2004.
- [5]陈云敏,柯瀚,陈仁朋.软土地基上拓宽工程差异沉降机理与控制研究[J].岩土工程学报,2007,29(1):714.
- [6]周顺华,冯忠居,余天庆.拓宽路基差异沉降对路面结构附加应力的影响分析[J].公路交通科技,2012,29(5):16.
- [7]孙钧,周健,赵明华.土工格栅加筋拓宽路基性状的模型试验研究[J].岩土力学,2005,26(7):10811085.

作者简介: 罗丹(1982.8—), 男, 石家庄铁道学院, 中铁二十二局集团第五工程有限公司, 项目总工, 工程师。