

文章编号:1001-7372(2013)03-0001-36

中国道路工程学术研究综述·2013

《中国公路学报》编辑部

摘要: 为了促进中国道路工程学科的发展,系统梳理了国内外道路工程领域(包括路基工程、路面工程、公路支挡结构、道路几何设计)的学术研究现状、热点前沿、存在问题、具体对策及发展前景。首先对路基沉降变形特征、拓宽路基沉降控制、路基稳定性分析方法、特殊土路基处治技术等进行了综述;并对沥青及其混合料、水泥混凝土路面和多年冻土地地区路面分别进行了分析;同时基于支挡结构特点,对公路常用支挡结构的适用条件、加固原理、设计计算理论等研究成果进行了总结;最后对道路智能选线及 3D 道路设计技术、道路交叉设计、面向路线设计的汽车行驶特性预测技术、路线设计质量评价技术等新理念、新技术进行了剖析,以期为道路工程学科的学术研究提供新的视角和基础资料。

关键词: 综述;道路工程;路基工程;路面工程;支挡结构;道路几何设计

中图分类号:U41 文献标志码:A

Review on China's Road Engineering Research: 2013

Editorial Department of *China Journal of Highway and Transport*

Abstract: In order to promote the development of China's road engineering subject, the academic research status, hot issues, existing problems, correspondent countermeasures and development prospects about road engineering at home and abroad (including subgrade engineering, pavement engineering, highway retaining structures, road geometric designs) were studied systematically. Firstly, subgrade settlement and deformation characteristics, settlement controls in subgrade widening, subgrade stability analysis methods, and special subgrade treatment techniques, etc. were reviewed. Secondly, asphalt and its mixtures, cement concrete pavements and pavements in permafrost regions were analyzed respectively. Then based on the characteristics of retaining structures, the application conditions of highway retaining walls, their strengthening principles, the calculations in their designs and so on were summarized. Finally, new ideas and techniques in the intelligent alignment selection, 3D road design technology, designs of road intersections, vehicle driving characteristics prediction technology for route designs, alignment design quality evaluation technology, etc. were dissected. Hopefully, the research can provide new perspectives and basic data for the academic researches on road engineering subject.

Key words: review; road engineering; subgrade engineering; pavement engineering; retaining structure; road geometry design

0 引言

道路是国家经济和社会发展的基础设施,社会经济水平和交通运输需求决定着道路的发

展进程,而道路交通也制约着社会经济和交通运输的发展水平。自 20 世纪 50 年代开始,一些发达国家的汽车生产量和保有量大幅度增加,致使交通量激增,因此道路建设特别是高速公路建设迅猛

发展;中国在改革开放后的30多年间,道路建设规模也不断扩大,目前公路网规模已跃居世界第2位。与此同时,随着道路工程领域相关研究的不断深入,道路新结构、新工艺、新材料等不断涌现,新技术应用水平和研究水平也达到了空前的广度和深度。然而,迄今为止,学术界缺乏对整个道路工程领域学术研究成果的系统总结与梳理。为了促进中国道路工程学科的发展,充分发挥《中国公路学报》在公路交通行业的学术引领作用,本刊编辑部约请了道路工程领域的专家、学者20余人,在分析行业发展现状与趋势的基础上,围绕路基工程、路面工程、公路支挡结构、道路几何设计四大主题,论述国内外该领域的学术研究现状、热点、存在的问题、具体对策及发展前景,以期为中国道路工程学科的学术研究与发展提供参考和借鉴。由于资料、水平有限,加之时间仓促,该综述还不够系统和完善,对一些问题分析的深度和广度还不够,敬请广大读者批评指正。

1 路基工程

中国公路建设规模的不断扩大和公路等级的提高,对公路工程设计与施工技术提出了更高的要求。随着高等级公路向工程地质条件复杂地区的延伸,以及改扩建工程的日益增多,给路基工程设计施工带来了诸多的技术挑战。中国公路工程技术人员经过多年的研究与实践,在路基沉降变形特征、拓宽路基差异沉降控制、路基稳定性分析方法、特殊土路基处治技术等方面取得了丰硕的研究成果,为中国公路工程建设事业的飞速发展做出了重要贡献,同时也为今后公路路基工程的设计与施工积累了宝贵的经验。

1.1 路基沉降变形特征

路基沉降分为2个部分:①路基自重引起的沉降,由瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降组成;②交通荷载引起的累积沉降,该沉降是低矮路堤天然软土地基或者排水固结法处理软土地基沉降的重要组成部分。有限元和有限差分等数值分析方法的发展使得路基沉降计算可采用非线性、弹塑性、粘弹塑性等多种土体应力-应变关系的模型,还能考虑到较为复杂的土体本构关系,如粘弹塑性模型、考虑损伤效应的弹塑性损伤模型等,同时还可考虑复杂的边界条件、土体应力-应变关系的非线性特性、土体的应力历史及多场耦合效应,可模拟现场逐级加荷和处理超填土问题,能考虑侧向变形、三维渗流对沉降的影响,并能求出任意时刻的沉降、水平位移、孔隙

水压力和有效应力的变化^[1]。但是,数值分析过程中土体变形和强度等计算参数的取值决定了计算的精度,土体力学参数与应力历史、状态等有着重要关系,但现有的试验方法并不能全面反映其相关性,同时现场取样过程中的扰动也影响了参数取值的精度,因此需要进一步研究和建立基于原位试验(SPT,CPT等)的土体力学参数取值方法,以减小取样扰动等的影响。

路堤高度的降低使得天然地基上部位于车载作用的范围内,在交通荷载的反复作用下,会产生累积沉降。Fujikawa等^[2]对佐贺空港高速的研究结果表明,交通荷载引起的沉降约占总工后沉降的50%,达400~600mm,可以看出这是一个不可忽略的值。凌建明等^[3]对上海市外环线北翟路口交通开放后2年的实测数据分析表明,道路路面累积沉降达9~10cm。对交通荷载引起的累积沉降,规范中缺乏相应的计算方法。现有的方法主要基于循环荷载作用下土体的经验累积变形模型进行计算。Abdelkrim等^[4]基于结构分析法、凌建明等和耿大新等^[5]根据室内动三轴试验分别对交通荷载引起的软粘土地基累积沉降进行了分析。李进军等^[6]利用Li-Selig累积变形模型^[7]对上海软粘土地基的累积沉降进行了计算,但计算中将车载视为静载。崔新壮^[8]基于黄茂松等^[9]提出的软粘土累积变形模型和孔压增长模型,通过对车载作用下地基的动态分析,提出了考虑车载和路堤高度的累积沉降预测模型。文献^[10]中提出了一种交通荷载现场模拟装置,并利用其对交通荷载作用下黄河三角洲粉土地基的短期累积沉降进行了模拟,同时基于Chai-Miura累积变形模型^[11]对长期累积沉降进行了数值计算。但是,交通荷载作用下地基的累积沉降精确计算是相当困难的。动三轴试验表明,软土存在一个最小循环动强度,动应力小于该最小循环动强度时,无论经过多少次加载过程土体都不会破坏,地基的累积残余变形保持很小。因此,结合交通荷载作用下地基内部动应力分布,根据软土的最小循环动强度可确定地基内部的临界边界。只要合理处理临界边界范围内的土体,地基累积沉降可得到有效控制。

随着光纤传感技术的发展,有人用分布式光纤测试技术对路基的沉降进行了测试^[12],其原理是通过测试光频率的改变来得到光纤的应变,应变是标量。但为了监测路基的二维运动,必须布设光纤网络,成本高,不适合大范围沉降监测。近年发展起来的GPS技术与合成孔径干涉雷达SAR技术^[13-14]适

用于监测面积较大的区域,精度高,但受障碍物、天气等因素的影响,测量点选择易受到限制。另外,全站仪也可用于路基沉降测试,也有人在研究直接将 CCD 技术用于路面的沉降监测中,这些监测手段测试精度高,但是受外界恶劣环境的影响大,不易维护,而且监测成本很高。基于前期沉降实测数据,多种经验曲线模型被用于预估后续的沉降,如指数曲线模型、双曲线模型、Logistic 模型、Verhulst 模型、生长曲线模型等。曲线模型对于预估路基工后沉降和最终沉降量具有较高精度,但需较长时间的观测资料,否则易导致推算值产生较大误差^[15]。

1.2 拓宽路基沉降控制

经济的迅猛发展对高速公路通行能力提出了更高的要求。在此背景下,许多高速公路需要进行改扩建。目前中国已完成了如沈大、沪杭甬、沪宁、广佛、佛开、福厦漳、京港澳郑洛段与安新段等高速公路改扩建项目。道路拓宽处理技术应用不当,将会产生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^[16]。改扩建道路荷载会增加新建及原有道路地基中的附加应力,使地基产生进一步沉降和侧向变形。改扩建道路设计应实现老路和新路路基、路面在横向和纵向的变形协调,防止新、老路面出现开裂。因此,改扩建道路应解决 3 个方面的问题^[17]:①原有道路沉降与稳定状况的调查和评价;②新、老道路纵向和横向沉降协调,控制新、老路差异沉降;③控制老路路基和地基侧向变形,防止路面开裂。Richard 等^[18]曾对道路拓宽技术进行了总结。路基不均匀沉降规律研究是路面结构附加应力计算的前提。部分学者^[19-22]借助离心模型试验研究了不同方法处治软土地基后土体的变形性状;Allersma 等^[23]将离心模型试验、有限元分析和现场试验结合起来,研究了施工过程中软土地基的力学特征和变形特性。拓宽道路的新老路基施工时间相差若干年,因此与新建道路相比,其计算更加复杂,国际上众多学者采用 Plaxis 有限元程序进行沉降计算^[24]。周志刚等^[25-26]运用弹性力学平面应变有限元法分析了一般地基上道路加宽中新路在自重作用下的沉降和应力分布规律,并根据强度理论,提出了防止新老路相接处产生裂缝的处理方法。陈星光等^[27-28]利用有限元分析模拟了加宽方式、路基高度、地质条件等多个因素对差异沉降的影响规律。王涛等^[29]对文献^[30]中旧路改建高速公路引起的沉降规律进行了分析,将新填筑路基看作偏心荷载,定义老路基高度和新路基高度之比为偏心度,对不均匀

沉降与最大沉降点位置随偏心度的变化规律进行了研究。凌建明等^[31-32]针对道路拓宽工程的荷载形式,综合分析了地基自重应力场、老路基一次附加应力场和新填筑路基二次附加应力场的分布特征,指出一次附加应力和二次附加应力相向增长的叠加效应是导致旧路边坡区域浅层地基差异沉降显著的主要原因。不均匀沉降不仅会引起路面附加应力,而且会导致纵坡或横坡坡度增大以及行车舒适度降低,因此很多学者在研究沉降指标和控制标准时既考虑了路面功能要求,又考虑了路面结构要求。张军辉^[33]从行车安全和便于排水角度,建议以 0.5% 的变坡作为由于软基差异沉降所引起的坡度变化容许值,而从舒适性角度,坡度变化的限制为 0.46%。周虎鑫等^[34-35]从规范中的路面纵坡、横坡、平整度及路面结构强度要求的角度出发,研究发现路基不均匀沉降指标应为 0.4%,这和文献^[36]中的研究结果相同。文献^[36]中以佛开高速公路拓宽工程为例,根据附加应力计算结果,将差异沉降分为轻微、低、中、高 4 个等级,并认为差异沉降属于中级时,须采取措施控制沉降量。杭甬高速公路拓宽工程是中国首条深厚软基上高速公路拓宽工程,老路采用排水固结法处理,建成 10 年沉降速率仍然有 3~5 mm·月⁻¹。文献^[17]的计算分析表明,老路沉降主要由次固结变形引起,拓宽荷载作用下老路和新路的差异沉降会导致新、老路路面和基层中的拉应力超过容许值。拓宽路面铺设时,不宜参照软土地基上新建路堤的工后沉降控制标准,而应在分析新、老路堤沉降规律的基础上,以新、老路堤工后沉降差作为控制标准^[37]。现行《公路路基设计规范》(JTGD30—2004)根据江苏、浙江、广东等省软土地基地段高速公路拓宽的实践经验,规定工后的横坡坡度增大值不超过 0.5%。

1.3 路基边坡稳定性分析方法

随着中国经济的发展以及基础设施建设力度的增加,高速公路建设迅速向山区扩展,然而,由于山区地形地貌的复杂性,建设过程中会不可避免地出现深挖高填的情况,从而使公路沿线形成大量的人工边坡,其破坏了原有的地质环境平衡,而且在各种自然与工程因素的影响下,会引起边坡岩土体的变形甚至破坏,因此进行公路边坡的稳定性与加固技术研究具有重要的意义。

现有边坡稳定性分析方法种类繁多,主要可分为定性分析方法、极限平衡法、滑移线法、塑性极限分析法、数值分析法、不确定性分析方法以及其他分

析方法。定性分析方法是通过工程地质勘察、借鉴已有类似工程以及专家经验的基础上对边坡工程的稳定性进行一个定性的评价,从而判断滑坡稳定性状况及可能的发展趋势。目前各国学者提出的边坡极限平衡方法很多,在早期,由于计算量的限制,为便于手工计算,当时出现的极限平衡方法都做了比较大的简化,如 Fellenius 提出的瑞典圆弧法^[38]和 Bishop^[39]提出的 Bishop 条分法等。之后,随着计算机的出现和普及,人们开始摆脱人工手算的限制,许多学者开始研究更为严格的方法。塑性极限分析法从塑性力学出发,将岩土体看作服从流动法则的理想塑性体,当外力达到某一值时,在外力不变的情况下岩土体材料发生塑性流动,此时边坡岩土体处于极限状态,所受荷载为极限荷载。在塑性极限分析法研究方面,Chen^[40]、潘家铮^[41]、Donald 等^[42]和陈祖煜^[43]等做了大量的研究工作,促进了塑性极限分析法的发展与应用。数值计算理论的迅速发展,使得采用理论体系更为严密的应力应变分析方法分析边坡稳定性成为可能^[44]。数值分析法分析边坡稳定性的本质是单元离散,即通过计算网格将岩体分成若干个小单元体,然后将任一可能滑动面分成若干微段,并经过应力张量变换,运用追踪法、位移法、强度比值法或平面应力投影法来求得相应微段的正应力和切向剪应力,再建立力矩平衡。近年来,边坡工程设计与分析中涉及到的大量不确定性因素越来越为人们所认识,而且这些因素的不确定性并不会因为提高试验和勘探的精确性就能完全消除,因此许多学者将不确定性分析理论引入到边坡稳定性分析中,应用和发展了各种随机理论和方法,以期提高边坡工程质量状态判断的精度。随着一些新的理论和方法(如突变理论、混沌理论以及遗传进化算法等)的出现,很多学者将其引入边坡稳定性分析中建立了一些新颖的边坡稳定性分析方法,如突变理论评价方法^[45]、神经网络评价法^[46]以及反分析方法^[47]等,这些方法的出现促进了边坡稳定性的研究,具有重要的理论意义,但是提出的时间不长,还没有被普遍接受,因此在工程实际中的应用并不多见,有待进一步的应用研究。

现有各种边坡稳定分析方法均没有达到真正完全解决工程实际问题的程度,因此仍需进一步深入研究,同时,各种技术革新、数学、力学及计算机技术的快速发展等都为边坡稳定性分析方法的研究和发展创造了很好的条件。随着中国经济的发展,以及公路建设的快速扩展,公路工程建设中遇到的边坡

形式越来越复杂,公路边坡加固技术研究具有如下趋势:①边坡的开挖破坏了原有植被覆盖层,出现大量次生裸地并产生严重的水土流失现象,破坏了原有的自然景观,也造成了生态环境的严重失衡,随着中国经济增长方式的改变以及生态观念的深入人心,中国的高速公路边坡越来越多地采用生态防护形式,在保证边坡稳定的前提下,使边坡重新披上绿装,甚至进行一定的生态恢复;②目前遇到的边坡形式越来越多样化,也越来越复杂,而现有许多新提出来的加固技术在理论分析上还不成熟,在其推广应用之前,应进行充分的试验研究,尤其是大比例模型试验研究,从而在理想状态下验证一些理论假设的正确性,继而在实际工程中类比应用;③研究一些新的固化剂(无机材料固化剂、离子固化剂以及复合型固化剂等)用来改良边坡岩土体的物理力学性质,以及开发出一些耐久性好、强度高和施工灵活方便的护坡结构等。

1.4 复合地基处治技术

高速公路的大规模建设促进了中国软土地基处理技术的快速发展和提高。中国地基处理技术,特别是软土地基处理技术是岩土工程界最为活跃的研究领域之一,大有“百花齐放,百家争鸣”的局面^[48-49],不断出现的新的地基处理方法,形成了极富特色的地基处理新体系。

高速公路工程中,对于深度 20 m 以内的软土,水泥土搅拌桩复合地基得到了大量应用。许多学者对水泥土的特性开展了深入系统的研究,建立了更合理实用的强度预测公式,对高含水量土、高有机质土和高含盐量软土,得出了相应的添加剂使用量、处理效果及其内在作用机理。以前对干法搅拌桩(粉喷桩)存在一些认识误区,一些地方限用,但在高速公路工程中得到了成功应用,许多学者对粉喷桩的特性进行了深入的研究,明确了湿喷桩和粉喷桩优缺点和适用条件。水泥土搅拌桩复合地基的另一个重要进展是新型搅拌桩复合地基的发展。如粉喷桩联合排水板加固法、长(排水)板短(搅拌)桩法、顶部扩大的钉形搅拌桩等,这些都取得了发明专利并在工程中取得了成功应用。

为了提高水泥搅拌桩的搅拌均匀性,提高有效加固深度,减少对周围土体的扰动,东南大学发展了双向搅拌桩技术。该技术采用同心双轴钻杆正反向同时旋转搅拌水泥土形成搅拌桩。在双向搅拌桩技术的基础上,根据变置换率复合地基原理,成功发展了钉形水泥土双向搅拌桩,简称钉形搅拌桩^[50-51]。

针对软土层位于中间的成层软弱地基,发展了变径水泥土搅拌桩,在软土层中采用较高的桩体面积置换率,形成桩体面积置换率随土层性质变化的成层复合地基^[52]。该技术克服了中国传统搅拌桩设备的固有缺陷,能从根本上改善搅拌桩的均匀性和质量,已在中国高速公路工程中得到推广应用。搅拌桩的强度和加固深度主要受搅拌均匀性和固化反应程度控制。

深度超过 20 m 的深厚软土地基处理一直是高速公路工程中的难题。桩承堤在路堤底部填土设置水平土工合成材料加筋垫层及带托板的刚性和半刚性桩处理地基,具有施工方便、工期短、侧向变形和工后沉降小等突出优点,特别适用于需要快速施工或者对沉降要求比较严格的工程。桩承堤自从 2004 年在杭甬高速公路拓宽工程中成功应用以后,逐渐在中国的新建及拓宽高速公路中广泛应用,已经成为深厚软基、高填土路基及沉降控制严格路段典型的道路结构形式。工程中应用的桩型包括 PHC 管桩、CFG 桩、PCC 管桩、素混凝土桩等。振动沉模现浇混凝土薄壁管桩(PCC 桩)技术是河海大学自主开发研制的用于地基加固处理的专利技术^[53]。振动沉模现浇混凝土薄壁管桩技术,采取振动沉模,自动排土、现场灌注混凝土而成管桩,具体步骤是依靠沉腔上部锤头的振动力,将内外双层套管所形成的环形腔体,在活瓣桩靴的保护下,打入预定的设计深度,在腔体内现场浇注混凝土,之后振动拔管,在环形域中土体与外部的土体之间形成混凝土管桩。在形成复合地基时,为了保证桩与土共同承担荷载,并调整桩与桩间土之间竖向荷载及水平荷载的分担比例以及减少基础底面的应力集中问题,在桩顶设置褥垫层,从而形成现浇薄壁管桩复合地基^[54]。PCC 桩结合了预应力管桩和振动沉管桩等技术的优点,其设计方法、施工工艺及其质量检测方法已形成《现浇混凝土大直径管桩复合地基规程》(JGJ/T 213—2010)。

相比于传统的水泥搅拌桩、砂石桩等,这类新型桩的刚度较大,桩身的压缩小,桩身质量易于控制。桩承堤设计涉及到的关键问题包括:①路堤土拱效应及桩土荷载承担比;②路堤沉降组成及规律;③桩身负摩阻力及承载力;④路堤地基稳定性。

路堤土拱效应研究表明,路堤高度 H 和桩托板净间距 S_0 的关系应满足 $HS_0^{-1} > 1.4$,以使路堤填料中形成完整土拱,否则路堤顶面会出现蘑菇状的不均匀沉降^[55-57]。英国、德国、北欧等规范和标准中

提供了桩土荷载分担比(或者桩土应力比)计算公式,但是这些公式计算结果与实测结果仍然存在一定差异^[58]。而中国目前还没有相关规范提供考虑土拱效应的桩土荷载分担比的计算公式。交通荷载会弱化土拱效应,导致桩荷载减小,桩间土荷载增加,并增加路堤沉降。对于沉降控制严格的路堤,尤其是高速铁路路堤,需要研究动荷载下土拱演化规律,并分析其对路堤沉降和荷载分担比的影响。加筋垫层的应用表明,垫层能够有效减少路堤不均匀沉降、增加桩土荷载分担比,从而实现减小托板尺寸、增加桩间距的目的^[59-60]。但是,现有土工合成材料加筋垫层的理论和试验研究还很难从机理上揭示这种作用,这方面的研究还有待加强。

在路堤的沉降控制方面,当路堤软弱下卧层较薄时,路堤沉降主要是由桩身范围内的沉降引起的;而当存在深厚软弱下卧层时,下卧层的厚度是影响路堤沉降的最主要因素,工程中可以通过控制桩长来减小路堤的沉降^[61-62]。下卧层沉降计算的准确性取决于下卧层附加应力及压缩性指标的确定^[63]。当下卧层较厚时,下卧层地基固结仍然会引起路基较大的沉降,此时需要考虑固结的影响^[64-65]。

交通荷载作用下,低矮路堤桩顶会受到循环动荷载及静荷载的共同作用。模型试验研究表明,在竖向循环荷载下,桩的累积变形发展可以分为 3 种模式:不发展型、持续发展型、急剧破坏型。不同的循环荷载比 R_{CLR} ($R_{CLR} = P_d/P_u$, 其中 P_d 为桩的最大动荷载, P_u 为单桩极限承载力)和静荷载比 R_{SLR} ($R_{SLR} = P_0/P_u$, P_0 为桩的静荷载)组合下桩的累积沉降发展规律不一样^[66]。对于需要严格控制路堤累积沉降的道路,需要考虑桩的循环累积沉降。

由于托板桩顶附近的桩间土沉降大于桩的沉降,导致桩身上半部出现负摩擦力。负摩擦力的发挥程度与桩顶荷载、地基固结程度等都有密切关系^[67-68]。在进行单桩承载力计算时,应该要考虑负摩擦力作用。

在路堤稳定性计算方面,复合抗剪强度极限平衡法不能反映不同位置单桩的破坏机理,将显著高估路堤稳定性,稳定性分析时需要考虑路堤趋于失稳破坏过程中桩的弯曲破坏^[69-70]。

1.5 冻土路基处治技术

多年冻土地区路基的冻结及融化过程是温度场、水分场及应力场相互作用所引起的,是极其复杂的传热学、物理化学和力学的综合问题。近 40 年以来,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、中交第

一公路勘察设计院、长安大学等科研单位针对不同路基高度、路面材料、地貌单元、冻土气候环境等条件,进行了冻土路基温度场现场观测和勘探,分析了冻土上限、地下冰的分布状况等,对于分析多年冻土地区路基性能具有重要的借鉴意义。

在理论研究方面,Li等^[71-73]在冻土中骨架、冰、水、气体多孔多相介质的基础上,建立了冻土多孔多相微元体的平衡方程、多孔固液介质的质量守恒方程及多孔多相介质的热、能守恒方程,进一步分析了冻土的冻胀与融沉现象;何平等^[74]基于热力学原理建立了土体冻结过程中的三场耦合方程,探讨了土冻结过程中的体积变化、冻结缘和分凝冰的形成;李洪升等^[75]将冻土体视为空间弹性体,提出了土体在冻结过程中水分场、温度场、应力场三场耦合的一般数学模型,并给出了相应的离散方程及其解法;朱志武等^[76]根据传热学、渗流理论及冻土力学提出了带相变的温度场、水分场和应力场耦合问题的数学力学模型及其控制方程,专门从力学机理出发研究冻土的三场耦合及其本构关系;毛雪松等^[77]等研发了路基湿度、温度、荷载耦合试验测试系统,在室内进行了不同条件下路基湿度、温度及承载能力的测试,并基于温度场方程、水分迁移控制方程和应力-应变控制方程,建立了考虑路基水热耦合引起路基变形的路基湿度-温度-荷载耦合模型;李东庆等^[78]考虑了基质势和压力势与温度的关系,给出了季节性冻土水-热-力三场耦合的数学模型,将耦合问题归结为求解一个非线性、非稳态温度场微分方程,并以典型路段为例,分析了温度、含水量、应力及蠕变变形的变化过程。在路基温度场变化方面,王铁行等^[79]为了解决冻土温度随时间变化和相变影响问题,引进了非稳态相变温度场理论,建立了考虑相变的路基非稳态方程;毛雪松等^[80]取用多年冻土地区代表性土类进行冻土路基室内足尺模型试验,并建立伴有相变的温度场方程,从试验与数值模拟的角度,验证了温度场模型的可靠性;汪双杰等^[81]考虑青藏公路的实际边界条件,分析了保温护道对冻土路基温度场的影响;刘志强等^[82]将边界条件和材料参数的随机性模拟为随机场或随机变量,采用摄动随机有限元法对其随机温度场进行了计算分析;苗天德等^[83-84]在连续统力学混合物理论框架下研究了冻土力学-热学性质,建立起固、液两相介质伴有相变的水、热二场耦合模型。随着计算机技术的发展,数值分析方法使得温度场的研究在复杂的边界条件、考虑非线性方面,在深度和广度上有了新的发展。汪

海年等^[85]考虑太阳辐射、气温、风速、风向及蒸发等真实气象条件,提出将诸多气象因素叠加为第Ⅱ类、第Ⅲ类边界条件组合的建模方法。

调控对流类工程措施主要是通过改变路基边界及路基体内部的对流换热状况以保证冻土路基的热稳定性,主要包括热棒、块石通风路堤及通风管路堤等技术。李永强等^[86]以青藏铁路清水河段热棒路基试验段为依托,分析了不同形式的热棒路基的热工特性,提出了热棒的合理布设位置、纵向间距和横向间距;潘卫东等^[87]对热棒工作时的几个关键要素之间的关系进行了初步分析,结合工程应用的测试试验数据,讨论了热棒在寒区工程中的应用效果;汪双杰等^[88]依托青藏公路整治改建工程典型试验段,进行了热棒路基降温效应的数值模拟,分析了热棒的工作周期、工作状态与作用半径以及热棒的设计形式;慕万奎等^[89]将热棒技术应用于伊春地区岛状多年冻土路基处理中,结合实测数据,分析了热棒技术在解决岛状多年冻土上限稳定方面的效果;刘戈等^[90]以青藏公路典型路段为依托,分析了热棒技术在处治路基融化盘偏移所引起纵向裂缝等病害的效果;孙文等^[91]建立了多年冻土路基温度场的三维数值计算模型,对普通路基、热棒路基在未来50年内的温度场进行了预报分析和比较;樊云龙^[92]采用室内热棒试验、五道梁段现场测试与数值模拟方法对热棒路基的降温效果进行了分析。

随着对冻土问题研究的进一步深入,对冻土地区路基病害机理的研究从单一的温度场研究,分析冻土上限的下降,逐渐向基于水热角度揭示路基变形发育的过程转变。刘永智等^[93]以青藏公路为依托,基于现场监测数据,分析了高温多年冻土地区冻土路基的路基随地温波动变化而发生的变形过程;胡长顺等^[94-96]对多年冻土地区路基纵向裂缝的特征、影响因素及发育机理进行了系统的研究;房建宏等^[97]等通过对多年冻土地区公路病害和机理研究及公路养护与维修技术研究,提出了多年冻土地区路基路面典型病害的形成机理和影响因素;温智等^[98]基于国道214线K369段典型公路纵向裂缝病害的监测,并结合有限元数值分析方法对公路路基纵向裂缝的形成过程进行了分析研究;徐安花^[99]研究了不同走向路基表面太阳辐射的分布,探讨了多年冻土区公路路基纵向裂缝与路基走向的关系;毛雪松等^[100]基于可可西里垭口现场剖面观测及温度场测试结果,分析了路肩下厚纯冰层的形成过程及其对路基不均匀变形、纵向裂缝的影响。

2 路面工程

近年来,路面工程领域发展迅速,出现了许多新理论、新方法和新材料。尤其是在沥青及其混合料、水泥混凝土路面和多年冻土地区路面这3个方面取得了许多新的研究成果。这些新的研究成果对于提高路面使用性能、延长使用寿命、节能减排以及资源的回收利用等都起到了良好的促进作用。

2.1 沥青及其混合料

2.1.1 改性沥青

改性沥青主要指聚合物改性沥青,其中SBS, PE, SBR与EVA是常见的四大类聚合物改性沥青。近年来随着技术的发展,胶粉改性沥青成为仅次于SBS改性沥青的一种主要改性沥青。环氧沥青由于有着出色的高、低温及疲劳性能,在钢桥面铺装上得到了广泛应用^[101],以Sasobit为代表的降粘剂或温拌剂也对常规改性沥青起到了补充改善性能的作用^[102],此外湖沥青、岩沥青及硬沥青也在改善高温性能及提高沥青混合料的模量方面发挥了重要作用^[103-105]。由于各种改性沥青均存在不同的优缺点,在对沥青性能要求较高的条件下,采用2种或2种以上的复合改性沥青方案具有一定市场。在各种复合改性方案中,SBS与其他改性剂复合是最常用的方式。

2.1.1.1 SBS改性沥青

(1)SBS改性沥青种类

目前中国最常用的是I-D或I-C类改性沥青,前者多用于南方,后者多用于北方。在常规SBS改性沥青基础上,通过增加SBS在沥青中的掺量,可以制备出各种特种改性沥青,如高粘度改性沥青,其PG分级一般在PG76或更高,常用于桥面铺装、OGFC等^[106];应力吸收层用改性沥青,除了较高的SBS掺量,还需保持沥青有较大的针入度,以提供良好的疲劳性能^[107];此外SBS改性沥青乳化可制备出性能良好的乳化SBS改性沥青^[108],提供比SBR乳化沥青更好的性能,如用于Novachip的粘层油,而且将SBS与石油树脂复合并造粒,可制备出高粘度沥青改性剂,可以用于OGFC等场合。

(2)改性机理分析

在适宜的温度和时间下将SBS与沥青进行混合,SBS可吸收沥青中的饱和分、芳香分发生溶胀,当SBS含量达到一定程度时可形成SBS网络结构,从而有效改善沥青的弹性和粘性。沥青中组分比例、SBS类型、掺量、SBS嵌段比、加工条件(加工方

式、时间、温度等)等均会对SBS沥青的相容性产生影响^[109-110],为增加改性沥青稳定性也可添加相容助剂或稳定剂来增加体系相容性,使其形成相对稳定体系。沥青中部分活性组分如环烷烃、多芳环等可以与烯键、酸碱性基团发生交联、枝接反应。增溶剂和稳定剂包括蒙脱土^[111]、纳米ZnO^[112]、磷化物、硫和硫化物^[113]、杜仲胶^[114]等,其加入可促进沥青与SBS的相容性或存储稳定性,对改性沥青的性能也有所提高^[115]。

(3)改性分析方法

在改性机理分析方法上,荧光显微技术(Fluorescence Microscopy, FM)使用最为广泛,通过荧光在沥青和改性剂表面反射波的不同来观察改性沥青的结构相态、比例、颗粒等信息,用于分析改性沥青的改性过程以及相容性^[116-120]。差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)通过动态零位平衡原理,采集补偿功率的变化情况,而由文献^[116]和文献^[120]可知,补偿功率的峰值区域可以用来分析改性沥青混合体系的热稳定性。稳定性好的改性沥青DSC曲线较为平坦,稳定性差的改性沥青对应的峰值区域则面积较大。红外光谱仪(Infrared Spectrum, IR)也常用于分析沥青体系的分子结构,可鉴定沥青中的特定官能团^[121]。分子模拟采用分子力学和分子动力学对SBS改性沥青的三维结构进行模拟并可得到内聚能密度和溶解度参数,可用于比较线形和星形SBS及其添加硫后的溶解性^[122]。

(4)发展前景

SBS因其优异的性能在道路工程中有着广泛的应用,但仍存在改性沥青相容性、存储稳定性等问题,同时实验室SBS改性沥青虽种类方案众多,而可提供的成熟稳定的SBS改性沥青相对较少。对SBS改性沥青的研究趋势主要有:①化学改性是SBS改性沥青的发展趋势之一,通过反应助剂增加沥青与SBS的反应界面和强度,形成稳定的改性体系;②提高复合改性质量,同时解决废旧塑料、轮胎等的回收处理问题,减少环境污染,提高复合改性性价比;③纳米改性剂可改善改性体系的稳定性和部分性能,具有较好的发展前景。

2.1.1.2 胶粉改性沥青

早在19世纪40年代天然橡胶就已被用于沥青中^[123],但由于当时的经济水平、胶粉改性沥青价格和难闻的气味问题,导致其使用并不广泛。20世纪60年代中期,亚利桑那州的一位工程师发明了将热

沥青与废旧轮胎橡胶粉混合的工艺^[124]（即“湿法”），采用该工艺制备的改性沥青后续的性能评估也令人满意，胶粉改性沥青的使用才重新兴起。此后，胶粉改性沥青在美国约40个州和世界超过25个国家得到了广泛应用。

胶粉改性沥青具有优异的减少反射裂缝，增加雨天抗滑性能和减少路面噪音性能，还可解决废旧轮胎的回收处理问题。

(1) 胶粉改性途径

胶粉改性沥青的制备方法分为3种：湿法，干法和 Terminal Blend 法。

湿法制备的产品即橡胶沥青，橡胶沥青中胶粉质量分数一般在18%~22%之间，有时还需加入橡胶油来降低沥青的粘度及沥青基质与橡胶粉的相容性。湿法通过高温（180℃~220℃）和较长反应时间（超过45 min）来促进胶粉与沥青之间的物理和化学反应，其反应受加工温度、时间、胶粉特性和细度、沥青基质中芳香分含量等因素的影响。

干法中胶粉与集料混合后加入沥青，故胶粉与沥青反应较少，胶粉实际上替代了部分集料。干法可用于密级配、开级配或者间断级配的热拌沥青混合料中，但其路面性能褒贬不一，并未在道路中广泛应用，而多用作庭院设施和轻型挡土墙的回填料。

Terminal Blend 法是湿法的一种，是指胶粉在炼油厂或沥青库与热沥青进行混融，胶粉质量分数在5%~18%之间，制备出可较长时间存储的改性沥青，称作 TB 胶粉改性沥青。TB 胶粉改性沥青可以存储，表面光滑像基质沥青，这些方面与橡胶沥青不同。TB 胶粉改性沥青的制作工艺与聚合物改性沥青相似，更像聚合物改性沥青而非胶粉沥青。

(2) 胶粉改性沥青性能评价

加州大学对胶粉改性沥青的性能通过 HVS 加速加载试验进行评价^[125]，结果表明：反射裂缝研究中，TB 胶粉改性沥青混合料取得了最好的效果，其次是橡胶粉改性沥青，普通沥青密级配 HMA 表现最差，其试验结果与室内弯曲梁试验和模拟早期反射裂缝研究的结果一致，TB 混合料路面的设计厚度仅需橡胶沥青路面的一半就可以满足抵抗反射裂缝的要求，但存在车辙风险。

Qi 等^[126]则研究发现在抗裂性方面，橡胶沥青表现最好，TB 胶粉改性沥青次之，PG70-22 改性沥青最差；而抗车辙方面则是 TB 胶粉改性沥青最好，橡胶沥青次之，PG70-22 改性沥青最差，车辙试验与加州大学的 HVS 试验结果相反。

中国相关研究表明，TB 胶粉改性沥青有着较好的低温性能，其与岩沥青或 SBS 复合，可获得较好的高温性能与疲劳性能，但 TB 胶粉改性沥青目前在中国还未有大规模应用。

(3) 胶粉改性沥青发展前景

基于大量的室内研究、现场测试和加速加载测试已经证明橡胶沥青和 TB 胶粉改性沥青在正确的设计和建造情况下，可以很好地抵抗反射裂缝，提高驾驶安全性，并减少路面噪声，胶粉改性沥青还能解决废旧轮胎的处理问题。橡胶沥青性能优异，但粘度大，无法储存，其应用发展需结合部分降粘剂，以改善工作性能和扩展应用范围；同时通过添加稳定剂、交联剂等制备可存储的橡胶沥青也是发展方向之一；橡胶沥青需在现场生产使用，对其质量的控制需要更深入的研究。TB 胶粉改性沥青具有优良的低温性能，对其进行复合改性使其在保持优良低温性能的前提下改善高温、疲劳等性能是今后主要的研究方向。

2.1.1.3 其他改性沥青

PE 改性沥青在 2000 年前后由 Novaphalt 公司带入中国并得到大力推广，主要以湿法的形式，采用胶体磨将其与基质沥青加工成改性沥青在现场现拌使用，后由于 SBS 改性沥青的广泛应用，PE 湿法较少使用。近年来由于法国高模量沥青混合料与抗车辙剂的广泛应用，PE 以干法的形式在中国得到广泛应用，主要以抗车辙剂的形式在市场上销售，其良好的高温性能得到了业界认可；SBR 改性沥青目前主要以乳液形式用于改性乳化沥青中，在新疆有少量 SBR 胶用于沥青改性，由于其良好的低温延度^[127]，在新疆有一定的市场；EVA 改性沥青欧洲以前应用较多，但由于成本较高，中国很少使用；由文献^[104]可知，岩沥青由于高温性能较好，且可以改善沥青粘附性，成本低廉，在山东、安徽等华东省份使用较多，其使用即有干法也用湿法。但岩沥青质量参差不齐，影响了其推广使用；湖沥青在中国使用已经有较长时间，其特点与岩沥青相似，路用性能也得到了认可，但由于其沥青含量较低，市场与价格不透明，影响了其使用前景。

随着对改性沥青要求的提高，改性沥青的工作性能受到影响，降粘剂应运而生，其代表为 Sasobit 费托蜡，其加入可降低 135℃ 粘度、提高高温性能，但文献^[102]中认为这会影 响抗水损害性能；此外 EBS 具有与之相似的特点，还可提高粘附性，今后将有较好的应用前景。这些材料由于可以降低沥青

混合料的施工温度,因此在更多的时候也被称为温拌剂。

环氧沥青由于具有优异的高低温、疲劳性能及粘附性,在钢桥面铺装得到了广泛应用,但环氧沥青施工要求高、成本高,其在钢桥面铺装上的应用前景还需要进一步确认。

由于每种改性沥青都各有优缺点,因此复合改性沥青成为进一步提高改性沥青性能或降低成本的有效手段。目前复合改性沥青多围绕 SBS 展开,常见的有在 SBS 中加入降粘剂以制备高粘度改性沥青或将胶粉改性沥青与 SBS 复合等^[128];此外 PE 与 SBR 复合、EVA 与 SBR 复合、SBR 与降粘剂复合、橡胶沥青与降粘剂复合也有报道。

2.1.2 温拌再生沥青技术

温拌再生技术(Warm-recycling Mixture Asphalt, WRMA)是一种集成了温拌技术和热再生技术优点的新技术,可减轻废旧沥青混合料(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)中的沥青二次老化、降低生产温度、增加 RAP 掺配比例,能更好地体现道路建设技术中材料的循环利用和节能减排。

厂拌热再生技术和 WMA 技术作为“绿色”施工技术,仍有一些技术瓶颈需要进一步突破和改进。目前,为了避免厂拌热再生中 RAP 旧沥青的二次老化以及提高 RAP 的掺配比例,美国、欧洲、中国等国家开始尝试将 WMA 技术和厂拌热再生技术相互结合起来,形成 WRMA 技术,从而通过借助 WMA 技术的性能优势,克服厂拌热再生技术的缺陷^[129-132]。采用 WRMA 技术不仅能够降低生产成本、节约能源、改善环境、减少有害气体的排放,而且可以降低 RAP 的加热温度,一般可降低 20℃左右,从而减少 RAP 在加热桶中的粘结现象,提高 RAP 的掺配比例,实现温拌再生沥青混合料中 RAP 掺配比例达 40%以上,大大提高了 RAP 的利用率。WRMA 技术可降低再生沥青混合料的拌和与施工温度 20℃~40℃,由于温拌再生沥青混合料的摊铺面降温速率一般为热拌再生沥青混合料降温速率的 50%,可使温拌再生沥青混合料压实时间延长,以致碾压时间更充分,压实更有效。

温拌再生技术在研究及推广应用过程中仍存在一些需要解决的技术问题:

(1)由于温拌再生沥青混合料的拌和温度相对较低,RAP 和新料中可能会残留一部分水分,因而会影响其水稳定性能,如何保持或提高其水稳定性,是一个亟待解决的技术难题。

(2)由于在温拌再生沥青混合料中加入了大量的 RAP,有可能对其低温性能和抗疲劳性能产生一定的不利影响。

(3)目前国内外缺乏对温拌再生沥青混合料长期使用性能的研究。

(4)目前国内外没有针对温拌再生沥青混合料的技术标准,温拌再生沥青混合料完全照搬热拌沥青混合料的技术标准,导致在研究及应用过程中具有一定的局限性。

2.1.3 功能型沥青混凝土

沥青混凝土因其良好的材料性能、路面舒适性、可机械化施工且便于维修养护等优点,成为中国高速公路路面层的主要材料类型。近年来,随着人们对路面服务水平要求的不断提高与路面使用环境不同而引发的差异性需求,对其在功能方面提出更多的要求,众多功能型沥青混凝土得到了快速发展。

(1)阻燃沥青路面

近年来随着沥青混合料在隧道路面铺装层上的不断应用,阻燃沥青技术得到了迅速发展。国外阻燃沥青的研究最早开始于 20 世纪 80 年代,以卤系和磷系作为阻燃剂,主要应用于屋面阻燃沥青油毡和沥青涂层^[133-134];中国在 20 世纪 90 年代开始进行阻燃沥青的研究,其主要应用方向也是沥青油毡和防水卷材^[135]。而对于道路阻燃沥青的研究则是进入 21 世纪才开始的,主要是通过添加多种阻燃剂和抑烟剂以提高沥青燃烧的氧指数,目前不仅取得了大量研究成果,而且铺筑了许多试验路段,制订了氧指数测试标准^[136-137]。

(2)排水沥青路面

排水沥青路面,是指水能在其中自由流动并从侧向排出的沥青表层,由高空隙率的沥青混凝土取代传统沥青混凝土,利用材料的内部连通空隙实现排水功能。在材料组成上,排水沥青混合料需使用高粘沥青、优质集料,并具有较大的空隙率(18%~25%)。此种混合料用作公路路面层的主要目的在于改善雨天行车的视线及降低行车噪音,还可提高路面抗滑能力,降低雨天行车时轮胎溅起的水雾量以及雨天夜间行车的反光量等。但此种路面也有一定的缺陷,如容易出现松散坑槽病害,大空隙容易因杂物堵塞而失去排水降噪功能,混合料疲劳性和耐久性较差,冬天路面维护工作复杂,不容易修补等^[138]。虽然中国已经铺设了一些 OGFC 试验段,同时也做了一定的研究工作,但与国外仍有一定差距,还没有系统的研究成果以及规范性的条文。如

何尽快开发适合中国地域特点的排水性路面,达到既有利于推广又能长久保持其路用性能的目的仍是摆在道路科技工作者面前亟待解决的课题。

(3)自愈合沥青混凝土

自愈合材料是一种能自动部分修复服役期间产生的损伤的材料。对于沥青和沥青混合料来说,自愈合就是材料性能的恢复以及裂缝的闭合^[139]。自1976年Bazin等首次提出沥青混凝土疲劳损伤自愈合特性以来,不断有研究证明沥青混凝土具有一定的疲劳损伤自愈合能力。当前业内对于自愈合沥青混凝土的主要研究方向在于自愈合行为机理、自愈合行为评价指标及其测试方法、自愈力增强技术等^[140]。沥青混合料自愈合技术包括:诱导式加热、自愈合微胶囊、纳米自愈合材料、自愈合记忆聚合物等。目前由于影响沥青混凝土疲劳损伤自愈合能力的因素十分复杂,自愈合理论以及合理的自愈合能力评价方法仍然需要系统深入地研究,而自愈力增强技术方面仍有很多技术问题有待解决,还需进一步完善^[141-142]。

(4)导电沥青混凝土

导电沥青混凝土是在普通沥青混凝土的基础上按照一定比例掺入导电相材料,通过改变沥青混凝土内部的结构组成使之由绝缘材料转变为可以导电的新型复合材料^[143]。适宜的导电相材料通常有钢渣、碳纤维、石墨粉、钢纤维等,其加入不仅可大大降低沥青混凝土的电阻率,使沥青混凝土具有较好的路用性能、优异的电学性能和高度灵敏的机敏特性,还可以帮助路面融雪化冰,以及实现路面内部结构损伤的自诊断与自愈合等^[144]。目前对于导电混凝土的研究方向主要在于导电沥青混合料的组成设计及制备工艺等。

2.2 水泥混凝土

近10年来,中国水泥混凝土路面研究方兴未艾,在水泥混凝土路面结构设计理论和方法、材料和施工技术、检测与养护维修技术等方面均取得了长足进步。

2.2.1 水泥混凝土设计、施工与维修

(1)设计理论和方法

水泥混凝土路面结构的荷载和温度应力一直是水泥混凝土路面研究的重点。水泥混凝土路面结构的力学模型从半无限弹性地基上薄板,逐渐转变为可反映超宽半刚性基层,以及设置沥青混凝土夹层的影响弹性地基上平面不等尺寸的双层板模型,水泥混凝土面层与基层的接触状况也从水平光滑竖向

连续转变为竖向受压连续,受拉脱开^[145]。这些成果已纳入2011年颁布的《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTGD40—2011)^[146](简称为现行设计规范,下文同)。

由于对水泥混凝土路面温度场研究不足,现行设计规范中的设计温度梯度值和疲劳温度系数等温度参数仍为20世纪八九十年代的研究成果,亟待深化。现行设计规范中有沥青上面层的水泥混凝土板的温度梯度修正系数,是根据近期结题的交通运输部西部交通建设科技项目《基于多指标的沥青路面结构设计方法研究》^[147]课题中的路面温度场研究成果推广得到的。

在道路工程设计领域,水泥混凝土路面结构设计方法中最早引入了可靠性设计理念。近年来,借力于多项交通运输部西部交通建设科技项目,基本理清了各种施工条件下水泥混凝土路面结构和材料性能的变异性规律^[148],但设计理论假设与实际状况之间尚不相符,存在一定偏差,有待进一步深入研究。

水泥混凝土路面板角断裂机理是近期的研究热点,目前的着眼点为:①由温度翘曲和基层冲刷引起板底脱空造成荷载应力增大^[149];②大面积荷载高应力区的尺寸效应;③混凝土硬化过程中,因路表失水引起的强度下降;④混凝土硬化过程中,因干缩和温缩不均匀引起的内嵌残余应力,文献^[150]指出,不同施工养生条件下,混凝土面层的内嵌残余应力可达0.5~0.8 MPa。

水泥混凝土路面板底脱空是路面使用性能恶化,路面板断裂,接缝唧泥、错台等结构损坏的主要肇因。路面板底脱空机理的研究主要从板底基层顶上滞留水的冲刷作用和基层材料抗冲刷能力两方面展开。国内外多位研究者采用现场实测的方法研究板底滞留水的冲刷作用^[151],但滞留水流态十分复杂,难以实测其流速和动力压力极值,直接应用流体力学分析滞留水冲刷作用尚处于起步阶段,现有的流体力学分析模型与实际状况尚有很大差距^[152]。基层材料抗冲刷能力的研究集中于研发试验仪器和评定方法^[153-154],其中,文献^[154]中开发了动水压力可控、射入角可调的道路材料冲刷仪,并总结得到了多种半刚性基层材料的冲刷次数、冲刷深度、冲刷应力比(冲刷动水压力和材料劈裂强度之比)之间的回归关系。

近10年来,中国在旧水泥混凝土路面上加罩沥青混凝土面层的工程实践和研究颇多。由于反射裂

缝产生机理复杂且影响因素众多,研究工作一直处于探索阶段。相对而言,温度型反射裂缝的力学分析较深入,对此采取的工程措施也较为成熟有效^[155];而荷载型反射裂缝的力学模型对实际结构受力状态的模拟度不高,采用弹性理论难以解决旧水泥混凝土路面接、裂缝引起的应力集中问题,而基于断裂力学的力学模型尚停留在二维状态,且对沥青混凝土材料的断裂强度参数缺乏充分认识。

(2) 施工、检测与维修技术

水泥混凝土路面的施工技术近年来得到了很大提升,淘汰了真空吸水、碎石颚式破碎等落后的工艺,完善和推广了效率高、工程质量好的滑模摊铺工艺,克服了设置传力杆对路面平整度的不利影响,这些成果均已纳入即将颁布的《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG/T F20—2013)^[156]。

水泥混凝土路面使用状况和结构病害的快速无损检测一直为各国道路工作者所重视。迄今,路面平整度、贯通裂缝的快速无损检测已广泛应用。近年来,中国众多研究者探索了应用探地雷达^[157]、声波反射^[158]、相对弯沉比^[159]等手段检测板底脱空,但无论是检测精度还是检测速度尚难以满足工程要求。接缝错台精度、填缝料损坏的快速无损检测精度也有待提高,文献^[160]中应用双目成像原理研究接缝错台的快速无损检测,其精度满足工程要求,有望大面积推广。另外,一些探索性研究也日趋增多,例如,应用结构动力学方法,研究有缺陷(面层有裂缝、板底有脱空)的实际水泥混凝土路面在行车荷载作用下的动力响应,进而试图建立路面动力响应与结构缺陷之间的联系。

近年来,水泥混凝土路面维修技术的研究和工程实践主要集中于快速修复技术、板底脱空灌浆技术、接缝填缝料损坏评定和修复技术^[161]。关于水泥混凝土路面的预养护技术研究虽多,但由于对水泥混凝土路面使用性能和结构性能衰退规律的认识还不够精细,因此,在预养护时机和对策选择两大方面距实用尚欠一步^[162]。

2.2.2 连续配筋混凝土

近年来,中国连续配筋混凝土路面(Continuous Reinforced Concrete Pavement, CRCP)取得了很大进步。CRCP是指在纵向设置连续钢筋,不设横向胀、缩缝(施工缝及构造所需的胀缝除外)的水泥混凝土路面。最早的CRCP于1921年出现于美国华盛顿特区。由于其可以改善路面行驶性能,延长路面使用寿命,同时养护要求较低,在国外已大量应用

于干线公路和机场。和国外相比,中国已建的CRCP里程相对较短,且多为试验路。

(1) 各国研究现状

在CRCP设计指标方面,美国混凝土学会(ACI)、波特兰水泥工作者协会(PCA)和美国各州公路工作者协会(AASHTO)对CRCP板厚设计均采用接缝式水泥混凝土路面的设计方法。1993年版的AASHTO方法采用维托公式计算最小配筋率。最小配筋率应满足以下2个条件:①混凝土的最大拉应力不大于极限拉应力;②裂缝处钢筋的最大拉应力不大于屈服应力。美国AASHTO 2002设计指南^[163]中以冲断和平整度作为CRCP基本设计指标,以裂缝宽度作为附加设计指标。其将冲断定义为2个间距很小的横向裂缝与短的纵向裂缝和路面边缘(或纵向接缝)所围成的区域。

在CRCP结构设计和分析方面, Kim等^[164]进行了大量的研究,其开发的软件已经从CRCP-1发展到CRCP-10。Selezneva等^[165]采用有限元方法进行了温度梯度、湿度梯度和车辆荷载综合作用下的CRCP应力分析。

在CRCP裂缝调查和分析方面,研究发现裂缝间距和裂缝宽度沿路纵向服从Weibull分布。Johnston等^[166]研究了材料组成、施工技术和环境对于CRCP早期开裂的影响。

在CRCP冲断研究方面,由文献^[163]可知,美国长期性能试验路调查表明,冲断多发生在较窄的裂缝间距(也称作密集裂缝)处,约90%的冲断发生在横向裂缝间距为0.3~0.6 m时,冲断与平均裂缝间距之间没有相关性。Gharaibeh等^[167]首次提出了冲断预测经验模型。AASHTO 2002设计指南(文献^[163])通过研究形成纵向裂缝的累积疲劳损伤来预测冲断的发展,根据平均裂缝间距和平均裂缝宽度来预估冲断数。Won^[168]对AASHTO 2002指南中的冲断力学经验法进行了完善。

在CRCP施工技术方面,学者们从集料选择、养生方法、裂缝主动控制等方面对CRCP的施工技术进行了研究, Sprinkel^[169]对CRCP上水泥混凝土加铺层进行了研究, Milne等^[170]研究了超薄CRCP的施工技术。

中国学者对CRCP车辆荷载作用下应力分析^[171]、环境荷载作用下应力分析^[172]、横向裂缝间距和宽度调查和分析^[173-174]、性能影响参数^[175]、连续配筋混凝土复合式沥青路面^[176]、使用性能预测^[177]、应力应变测试^[178]等进行了大量研究。王衍

辉^[179]考虑设计参数的变异性,采用增量分析和蒙特卡罗方法建立了 CRCP 横向裂缝的分布预估方法;宋柳^[180]对温度梯度、湿度梯度和车辆荷载综合作用下 CRCP 应力应变进行了分析,根据板顶纵向开裂来判断是否出现冲断;陈江^[181]均衡考虑强度、干缩和温缩系数,建立了连续配筋混凝土多指标配合比设计方法;贾建峰^[182]从抗冲刷和反射裂缝的角度建立了沥青混凝土夹层的配合比设计方法。

在设计指标方面,《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2011)中 CRCP 板厚设计仍以板底疲劳断裂作为设计的极限状态,纵向配筋率仍按允许的裂缝间距、缝隙宽度和钢筋屈服强度来确定,未直接采用冲断作为设计指标。由于冲断的影响因素很多,尤其是冲断与平均裂缝宽度和平均裂缝间距并不相关,导致目前的板厚及配筋设计不能有效预防冲断的发展。

(2) 评价与展望

到目前为止,虽然国内外对于 CRCP 进行了大量研究,但尚存在以下不足:

①设计方法中对宽裂缝病害考虑不足。宽裂缝和冲断是 CRCP 的两大主要病害,裂缝变宽主要由钢筋锈蚀后有效断面减小,钢筋中的应力达到屈服或断裂强度所引起。尽管 AASHTO 2002 中给出了平均裂缝宽度的计算公式,但该公式仅考虑了环境因素,未考虑车辆荷载的反复作用以及钢筋的锈蚀。

②国外冲断预估方法中对于变异性考虑不足。冲断容易发生在宽裂缝或密集裂缝处,与平均裂缝间距和平均裂缝宽度没有相关性,故 AASHTO 2002 中根据平均裂缝间距和平均裂缝宽度来预估冲断并不合理。而中国虽然考虑设计参数的变异性建立了 CRCP 横向裂缝的分布预估方法,但尚缺乏设计参数的数学分布、各地的气候参数等方面的数据,使其无法推广使用。

中国 CRCP 研究相比国外还有较大的不足,如规范中仍然未直接采用冲断作为设计指标,尚没有专门的 CRCP 设计程序等。

基于此,下一步需对宽裂缝、设计参数的变异性等问题进行深入研究,并需进一步开发 CRCP 设计程序。

2.3 多年冻土地区路面工程

冻土一般是指温度在 0°C 或以下,并含有冰的各种岩土。中国冻土地区约占国土面积的 22.4%。多年冻土区特殊的气候条件和地质条件,给道路设

计、施工及正常使用带来了巨大困难,多年冻土区道路修筑一直被视为世界性难题。中国研究人员在这一领域进行了大量研究^[183-188]。多年冻土区公路沥青路面设计与施工有其特殊性,路面破坏按损坏类型、严重程度及范围可分为裂缝类、变形类、松散类和其他破坏类型。

2.3.1 路面特殊要求

多年冻土区公路路面特殊的使用和施工条件使得路面设计与施工具有明显的特殊性,对路面材料与结构也提出了特殊要求,主要表现在以下几个方面:

(1) 路面材料的低温特性

多年冻土区长期处于低温条件下,路面半刚性基层混合料的强度形成缓慢,难以形成板体,无法充分发挥半刚性材料的优点;沥青易变得脆硬,沥青混合料的劲度模量提高,变形能力和应力松弛性能降低,导致沥青混合料的低温抗裂性能降低,容易产生开裂。因此,多年冻土区沥青路面材料设计中,应以低温特性为主,对路面基层与面层混合料的低温强度、低温抗裂等特性需提出更高要求。

(2) 路面材料的抗变形能力

多年冻土区公路路面材料的抗变形能力除满足行车荷载要求外,还要考虑温度作用和路基不均匀融沉变形的影响。多年冻土区气温降温速率快、昼夜温差大、蒸发率大,使得路面半刚性基层混合料的干燥收缩和温度收缩比一般地区更为严重,沥青混合料的温度收缩明显。路基不均匀融沉变形在路面结构内产生附加应力,因此需提高路面材料的抗变形能力。多年冻土区沥青路面结构设计不仅要考虑行车荷载的作用,还应重点考虑多年冻土区沥青路面结构与路基不均匀融沉变形的关系。

(3) 路面材料的耐久性

多年冻土区路面使用中频繁经受冻融循环和强辐射作用,影响程度明显高于一般地区,要求路面材料具有更高的抗冻耐久性,面层沥青混合料还需具有良好的抗辐射能力,以延长路面使用寿命。

2.3.2 路面结构设计要点

沥青路面吸热放热的不平衡是多年冻土区路基融沉变形与冻土上限变化的主要原因之一,同时,冻土路基的不均匀融沉变形使得多年冻土区路面结构产生不可忽略的附加应力,又是引起多年冻土区路面破损的主要原因之一,这种相互作用是多年冻土区路面区别于一般地区路面的主要特征。因此,在多年冻土区特殊气候与地质条件下,路面结构设计

应综合考虑温度、冻土路基不均匀变形、行车荷载的综合作用。

目前,多年冻土区公路以二级及以下等级公路为主,路面主要采用沥青路面。从对多年冻土路基不均匀融沉变形的适应能力考虑,柔性路面结构的适应能力优于半刚性基层路面结构;从高温时期减少外界热量侵入和保护多年冻土的角度出发,设置沥青碎石层和级配碎石层,或者增加路面结构层的厚度,可以有效降低路基顶面温度;考虑大温差及快速降温、持续低温阶段的沥青面层温度应力,设置级配碎石层的混合式基层路面结构和柔性路面结构的耐久性优于其他结构;基于冻土路基不均匀融沉变形与行车荷载综合作用下的路面结构应力,设置沥青碎石层或级配碎石层的混合式基层路面结构的耐久性优于其他路面结构。综合考虑不同因素对沥青路面结构适应性与耐久性的影响以及工程经济性,多年冻土区沥青路面推荐结构组合为混合式基层沥青路面,且其面层宜采用双层结构。

2.3.3 路面材料选择要点

多年冻土区沥青路面设计中,应根据工程气候特点,上面层选择 SBS 改性沥青、SBR 改性沥青或复合改性沥青,针入度等级宜为 90~110;道路石油沥青必须满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40)中 110 号 A 级道路石油沥青技术要求。沥青混合料宜采用骨架密实结构,重点考虑低温抗裂性能和抗冻性能,沥青混合料冻融劈裂强度比建议大于 85%。

水泥稳定粒料配合比设计中,应重视低温条件下的混合料强度形成和大温差条件下的混合料收缩性能,有条件时应进行模拟实际温度条件养生的强度试验,无条件时需对室内标准养生试件强度试验结果进行适当折减。

级配碎石最大粒径宜为 31.5 mm;Taibol 级配指数 n 值应控制在 0.45~0.50 之间,宜为 0.50;严格控制 4.75, 2.36, 0.6, 0.075 mm 等关键筛孔的通过率。

3 支挡结构

公路路基高填与深挖的边坡,桥梁墩、台、柱边坡,隧道洞口的仰边坡、浅埋与偏压边坡等都涉及到支挡结构。中国经过 20 多年大规模的公路建设,在引进、学习和借鉴各国其他行业先进成果的基础上,发展和创新了许多新型的支挡结构类型,积累了大量设计和施工的成功经验^[189]。本节基于支挡结构

特点,对公路常用支挡结构的适用条件、加固原理、设计计算理论等研究成果进行综述。

3.1 重力式、半重力式以及短卸荷板式等重力式挡土墙

重力式挡土墙是目前中国应用最广也是应用历史最长的一种挡土墙,其依靠自身重力来维持挡土墙在土压力作用下的稳定。当地基较好,挡土墙高度不大,石料取材方便时,应首选重力式挡土墙;当地下水位较高或在软弱地基上,则应采用半重力式挡土墙。20 世纪 50 年代,为适应西南山区地形陡峭、山洪频发的特点,出现了中国独创的衡重式挡土墙^[190],较重力式挡土墙可节省圬工 20%~30%。但当挡土墙较高时,其墙身截面还是很大,因此,随后又出现了一种改进型的结构形式——卸荷板式挡土墙,它可通过卸荷板减少墙背土压力并增加稳定力矩,提高墙体的抗倾覆稳定性。国外对卸荷板式挡土墙研究多集中在港工建筑物方面,而中国在公路与铁路工程设计与施工中对此种结构研究较多,已经形成了一套较为合理的设计计算方法。

重力式挡土墙的研究主要集中在墙后土压力的研究上,而土压力研究的关键在于对土压力分布形式及滑动面形状的研究。库伦土压力理论是应用较早也是应用较广的一种设计方法,该理论的典型特征是假定墙后滑动面为平面,计算得到的土压力沿墙高呈三角形直线分布。随着实践和理论水平的不断提高,很多研究表明土压力也可能呈非线性分布^[191],出现了很多假定墙后滑动面为圆弧线、摆线、对数螺线等曲线的研究成果^[192],同时一些智能优化方法也应用于滑动面的搜索中^[193-194]。目前公认观点是土压力的大小和分布与挡土墙类型及墙体位移形式有关,而滑动面形状则与土体性质及边坡类型有关^[195]。近年来,有学者对重力式挡土墙的动土压力问题^[196-197]、优化设计方法^[198]、抗滑稳定性有限元分析方法^[199]和可靠性分析方法^[200-201]等方面进行了研究,取得了一些可供工程借鉴的成果。

3.2 锚定板挡土墙

锚定板挡土结构是一种适用于填方的轻型支挡结构^[202],可分为肋柱式和无肋柱式 2 种。这种结构由墙面、刚拉杆、锚定板和填土共同组成,填土的侧压力通过墙面传至刚拉杆,刚拉杆则依靠锚定板在填土中的抗拔力维持平衡^[203]。1974 年,首座 12 m 高的多层锚定板挡土墙在太焦铁路线上建成,1976 年以后,铁路、公路等行业在不同线路和边坡工程上修建了一些锚定板桥台、锚定板挡填土。1990 年,

锚定板挡土墙的设计方法纳入《铁路路基支挡结构设计规范》^[204]中。

锚定板挡土墙结构设计计算的基本原理是锚定板有足够的抗拔力以确保锚定板结构的整体稳定,因此确定锚定板容许抗拔力是设计的重点。经大量现场原型实验,中国铁道科学研究院提出当锚定板埋置深度为3~10 m时其容许抗拔力从经验表格中选取,小于3 m时由被动和主动土压力差值确定。其后铁道第三勘察设计院采用龙口石英砂作为填料,基于大量室内模型试验和部分现场试验,也提出了锚定板容许抗拔力的经验公式,该公式与锚定板临界埋深比和尺寸系数有关。随后中铁第四勘察设计院在室内模型试验的基础上也提出了包含填土压缩模量的经验公式。事实上,由于锚定板挡土墙是由墙面、拉杆、锚定板以及填土组成的一种新型复合结构,受力较为复杂,上述3种计算模式尚有待在实践中进一步研究、验证。有限元分析结果^[205]表明其墙背土压力远大于主动土压力,分布形式与填料及地基材料参数有关,一般呈抛物线形分布。

3.3 土钉墙

土钉墙是在土质或破碎软弱岩质路堑边坡中设置钢筋土钉,依靠土与土钉之间的摩擦力使土体拉结成整体,并在坡面上喷射混凝土,以提高边坡的稳定性。20世纪70年代首先在法国应用,随后德国和美国在1970年代中期也开展了土钉墙技术的应用研究。中国虽然在1980年代初才开始土钉墙技术研究与应用,但在1990年代中期以后,在建筑、公路、铁路等边坡和基坑工程中已得到了大规模推广和应用。

土钉墙稳定性分析(包括外部稳定性和内部稳定性)是工程设计的重要内容,也是其应用的理论基础。对于外部破坏,工程中一般采用类似重力挡墙设计方法进行水平滑动、抗倾覆稳定、墙底土承载力和整体稳定性验算,对内部破坏分析,工程界目前尚无普遍认同的方法^[206]。极限平衡法是计算边坡稳定性较早采用的方法,也是目前土钉支护中应用最为广泛的方法之一^[207-208]。同时,有限元法也被应用到土钉墙计算中^[209-210],其不仅能计算土钉墙中的土钉内力,分析土体的应力应变关系,模拟开挖过程等,而且可以考虑土体的非均匀性和各项异性的复杂性状态。在工程实践中,许多简化分析方法也随之产生,中国目前常用的简化分析方法有:二分之一的割法、楔形破坏面法、双折线面法及王步云方法^[211]。随着工程实践的不断发

展,土钉墙的研究^[212-214]以及将土钉墙与疏排桩^[215]、桩锚^[216]等其他支护结构联合使用的现象逐渐增多。

3.4 预应力锚索加固

预应力锚索是一种主要承受拉力的构件,其通过钻孔及注浆体将钢绞线固定于深部地层中,在被加固体表面对钢绞线张拉产生预应力,从而达到使被加固体稳定和限制其变形的目的,其最大特点是能够充分利用岩土体自身强度和自承能力,大大减轻结构自重,节省工程材料。1934年,阿尔及利亚首次成功采用预应力锚杆技术加固坝体^[217-219];1964年,中国首次在安徽梅山水库运用预应力锚索加固坝基^[220];目前预应力锚索在中国岩土工程领域运用较为广泛。

对锚杆力学机理的认识与理论研究多集中在其破坏模式及锚固段应力分布2个方面。一般而言,锚杆的破坏方式有3种:①锚杆被拉断失去承载能力;②锚杆与灌浆体之间粘结力不够锚杆被拔出;③锚固体与土体之间粘结力不够被拔出。影响锚杆与浆体及浆体与围岩界面剪应力的因素较复杂,在当前的内锚段长度计算中,一般基于以下假设:①锚杆拉杆传递给浆体及浆体传递给周围岩土体的剪应力沿内锚段长均匀分布;②滑移或剪切破坏发生在拉杆与浆体及浆体与周围岩土体的界面上。实际上应力均匀分布的理想假设在岩土体中并不都适用,除了土体或沙层中,剪应力沿锚固段并不呈均匀分布^[221]。国内外学者分别采用幂函数^[222]、高斯曲线^[223]、双曲线^[224]来描述锚固段剪应力的分布规律。大量工程实践表明,按锚固段剪应力均布分布设计带来的误差在可接受的范围内,因此相关规范中仍然采用这一设计假定。近年来在预应力锚索的动力特性^[225-227]、长期强度^[228]、应力检测^[229]等方面出现了许多新的研究成果。

3.5 锚杆(索)挡土墙

锚杆挡土墙依靠锚固在稳定岩土层内锚杆的抗拔力平衡墙面处的土压力,主要有柱板式^[230]、板肋式^[231]、格构式^[232]和垂直预应力锚杆^[233]等结构形式。中国铁路从1966年开始在成昆线铁路工程中应用锚杆挡土墙,至今,锚杆挡土墙技术得到了长足的发展,现已广泛应用于铁路、公路等行业中。

锚杆挡土墙的研究主要集中在土压力计算和锚杆的设计方面。由于锚杆挡土墙构造特殊,侧向压力的影响复杂,如锚杆挡土墙变形的大小、锚杆是否施加预应力、锚杆挡土墙施工方法等都直接影响土压力的变化,肋柱、挡土板、锚杆和地基间也存在复

杂的相互作用关系。目前在理论上尚未有准确的计算方法能如实反映各种因素对锚杆挡土墙侧向压力的影响。从实测资料看,土质边坡锚杆挡土墙的土压力大于主动土压力,采用预应力锚杆挡土墙时土压力增加更多,现行的一些规范中多采用土压力增大系数来反映这一特性^[234];而岩质边坡变形小,应力释放较快,锚杆对岩体约束后侧向压力增大不明显。锚杆设计中尚有许多不确定因素,如地层形态、地下水和周边环境的影响,灌浆与杆体材料质量的不稳定性等,而相关规范均采用定值设计方法,且各规范的安全系数取值存在差异,给设计带来不便。针对上述问题,近来出现了锚杆挡土墙可靠性分析的研究^[235-237],可为锚杆挡土墙的可靠性设计提供参考。

3.6 加筋土挡土墙

加筋土挡土墙的挡土原理是依靠填料与拉筋之间的摩擦力平衡墙面所承受的水平土压力,并以基础、面板、帽石、拉筋和填料等组成复合结构而形成墙体以抵抗拉筋尾部填料所产生的土压力。加筋土挡土墙的优点是对地基承载力要求低,加筋的土体及结构均为柔性,在外力作用下具有较好的整体变形协调能力,不仅可适应较大的地基变形,而且与其他类型挡土结构相比具有良好的抗震性能。1965年法国首次成功修建了一座公路加筋土挡土墙,中国于1979年首次在云南建成加筋土挡土墙试验工程。目前其在公路工程中已得到了广泛应用。

加筋土挡土墙的设计方法是在保证其外部与内部稳定性的前提下,合理确定填料以及加筋材料的种类、长度、横截面形状、布置间距等设计参数。根据加筋土的特性,因外部失稳而导致结构破坏的情况一般很少发生,因此,研究加筋体的内部稳定性问题,特别是对拉筋拉力计算的探讨一直是研究热点,常用方法可分为3类:一是将加筋土视为锚固结构;二是视为“粘结”重力式结构(复合材料法);三是滑裂楔体法。随着研究的不断深入与发展,相继出现了对加筋土挡土墙的土压力分布^[238]、动力特性^[239-240]、位移特征^[241-242],以及对超静孔隙水压力作用下加筋土挡土墙稳定性的研究^[243],也有学者对台阶式加筋挡土墙^[244-245]和复杂断面加筋土挡土墙^[246]的设计方法以及失稳加筋土挡土墙的联合加固方案^[247-249]展开了专项研究,取得了一些对工程具有指导意义的研究成果。

3.7 抗滑桩

国外抗滑桩治理滑坡始于20世纪30年代,中

国始于20世纪50年代。抗滑桩在支挡滑坡的过程中主要承受侧向力,属侧向受荷桩,但其与一般建筑物桩基中承受侧向力桩的性质完全不同,其不是直接承受荷载并将荷载主动传递到土中,而是由于滑坡体在自重或其他外力作用下发生变形和移动,被动地承受坡体由于变形而产生的荷载作用,故抗滑桩又称为被动桩。国外一般把抗滑桩纳入侧向受力桩的范畴。抗滑桩包括普通抗滑桩、桩板式挡土墙、h形桩、门架形抗滑桩、锚拉抗滑桩等结构形式。

Stewart等^[250]对国外抗滑桩计算方法进行了归纳,可分为压力法^[251]、位移法^[252]、有限单元法^[253]、边界元法^[254]。与国外的研究不同,中国对抗滑桩的计算研究主要集中于加固岩土体边坡方面,尤其以加固大、中型破碎岩体滑坡为主。对于普通抗滑桩的计算,将滑坡推力作为外荷载作用于抗滑桩上,桩与岩土相互作用的力学计算模型一般采用线弹性Winkler地基梁模型,这种计算方法与上文提到的压力法类似。根据对桩前滑体的考虑方法不同,又可分为悬臂桩法和地基系数法^[255-256]。为使地基系数取值更符合实际,有学者提出了双参数法^[257]。为验证计算理论的准确性,中国学者通过模型试验、现场加载试验和原型试验,对抗滑桩的受力状态进行了多方面的研究,从而获得了许多宝贵的第一手资料,为深入研究抗滑桩提供了重要依据。近年来,许多学者通过室内试验或数值模拟结合合理理论分析对悬臂式抗滑桩^[258]、h形抗滑桩^[259]、埋入式抗滑桩^[260]、框架式抗滑桩^[261]、微型抗滑桩^[262]、双排抗滑桩^[263]、锚杆抗滑桩^[264]等形式抗滑桩进行了研究,可靠性理论也被引入到抗滑桩的设计中^[265]。

3.8 其他支挡结构

为了在某些特殊地形或地质条件下保证边坡的稳定,支挡结构出现了新的结构形式,这其中有些支挡结构已逐步推广应用,如上文介绍的支挡结构;有些结构在某些特定条件下起了较大作用,但由于其结构的特殊性或理论研究未能跟上,尚未得到推广或后来被其他结构逐渐代替,例如对拉式挡土墙、带洞路基墙、檐式挡墙、竖向预应力挡土墙等。随着工程的需要以及技术日益成熟,近年来国内外还出现了一些新的支挡结构,例如,倒Y形挡土墙、槽型挡土墙、钢筋混凝土预制块拼装式挡土墙等。今后,随着工程建设的不断发展,科技水平的不断提高,还会有一些新的支挡结构出现,中国的支挡技术水平也将迈上新的台阶。

4 道路几何设计

4.1 内涵、理念及其演变过程

道路几何设计,也称道路路线设计,常指道路、平面交叉口及立体交叉的平面、纵断面和横断面几何设计,设计者所要完成的任务是在已有的地形地物条件下确定出一条可供车辆以及其他道路使用者行驶的空间三维连续曲面。

公路路线设计理念是在一定的历史时期,受工程建设社会经济环境的影响,设计者在长期的工程实践、思维活动和交流中,所形成的对于公路路线设计的理性认识、理想追求及其所形成的设计思想观念和 design 哲学观点,是具有相对稳定性、延续性和指向性的设计认识、理性的观念体系。

中国公路建设大致经历了3个阶段,即建国后至改革开放前、改革开放后至20世纪90年代中期、20世纪90年代中期至今。

(1)建国后至改革开放前,中国国民经济基础薄弱,在计划经济的体制环境制约下,国家对公路交通的基础性和先导性作用认识不够,导致投资严重不足,公路建设资金十分匮乏。这一时期公路建设的任务是以通为主,公路建造技术和工艺水平相对落后,公路建设标准多为三、四级公路。这一阶段,制约公路设计方案的首要因素是建设投资形成了“设计的公路应该是经济的”公路路线设计理念。公路路线设计目标以经济、功能为主,较少考虑环保、交通质量等因素。

(2)改革开放后至20世纪90年代中期,中国经济开始步入持续、快速、健康发展的轨道,公路基础设施建设得到中央和地方各级政府的重视,其重要性逐步为全社会所认识。国民经济的快速发展,公路运输需求急剧增加,对公路建设的需求愈来愈迫切,公路建设由以前的“以通为主”向“提高公路的快速性”转变,主要任务是提高公路等级、质量和通行能力。高速公路开始建设,以满足国民经济对公路交通的需求。

这一时期,公路路线设计的理念是“快速、安全、经济、舒适”。具体表现在追求高标准,强调线形的舒展平顺,平纵组合协调合理,同时达到行车舒适、视野良好的效果。设计目标强调公路使用者的利益,强调交通质量、舒适、美观,忽视公路对环境的影响,高填、深挖常常诱发地质病害,被破坏的原有植被与水系又进一步造成水土流失的恶性循环。公路

设计指标的提高、交通量的增加以及交通安全设施的缺失等因素,也导致交通事故频发。

(3)20世纪90年代中期至今,受1997年亚洲金融危机及2008年金融危机的影响,国家采取了扩大内需的积极财政政策,大规模启动基础建设项目。公路基础设施建设迎来了前所未有的发展机遇,加之交通增长对公路建设的强烈要求,修建高速公路成了公路建设的主旋律。同时,国家经济环境的改善,使技术标准与工程造价之间的矛盾不再突出。

在此阶段,路线设计理论逐步从以往的“技术设计”思路发展为“以人为本”的新理念路线设计,体现了路线设计对“人-车-路-环境”综合考虑的必然发展趋势。近20年来,出现了灵活性设计^[266]、宽容性设计^[267]、自解释道路设计^[268]和综合最优化设计^[269]。目前,综合最优化设计的理念已得到广泛认可,研究人员开展了技术研究和教育推广,并总结了其近来应用CSD的工程案例,在实际应用中又发展出实用设计理念^[270],进一步深化和丰富了综合最优化设计的内涵。

中国也越来越重视道路设计新理念,在引入国外CSD设计理念的同时^[271],将其应用到工程实践^[272],取得了良好的综合效益,在今后的路线设计中值得大力推广。与此同时,中国的公路路线工程研究人员和设计人员在总结公路特别是高速公路建设经验的基础上,借鉴CSD设计理念提出“安全、快速、环保、和谐”及“六个坚持、六个树立”的公路设计理念。随着公路路线设计理念的转变,科研和设计人员逐步认识到公路是一个开放复杂的大系统,涉及人、车、路与环境多种因素,使系统内部某一方面最优(目标最大化)并不能实现整个系统最优的目的,不可能把某一目标最大化的同时而不降低其他目标。设计者或决策者需要在这些目标间协调,找出最佳的各目标平衡点^[273]。

此外,在2000年以前,道路路线设计研究更多地考虑设计方法、设计效率,如以计算机辅助道路设计系统等为代表的实用工具、以及道路自身的要求,体现了当时高等级公路建设“量”的要求;而进入21世纪之后,随着“以人为本”、“安全、舒适、环保、生态”等设计新理念的逐步深化,道路路线设计必然要考虑“人-车-路-环境”的相互影响,要求在设计阶段即考虑安全、舒适、效率等运营效果,并反馈修正、优化路线设计,体现了对提高路线设计“质”的追求,如表1所示。

表1 道路路线设计内涵的变化

Tab.1 Connotation Change of Road Alignment Design

方式	内容
传统的路线设计——更多考虑满足道路自身的要求	道路设计方法(改进导线法、曲线法等);道路优化设计;道路CAD开发与应用;勘测设计一体化技术;路线设计与环境生态、景观
现代的路线设计——综合考虑“人-车-路-环境”的要求	设计新理念;新一代数字化设计技术;路线三维设计与优化;驾驶行为与路线设计;考虑路面性能的路线设计;道路设计一致性;驾驶模拟仿真与路线安全评价;道路设计与环保节能;道路设计与道路文化

4.2 设计理论与方法的发展过程及进展

4.2.1 设计速度方法和运行速度方法

目前国际上存在2种并行的公路几何设计方法体系,一种是设计速度方法体系,使用的国家有美国、加拿大、南非、日本和中国等;另一种是运行车速方法体系,为澳大利亚、德国、法国、意大利、瑞士等国所采用。2种设计体系虽然采用不同的驾驶行为假定,但存在一个共性的、通用的法则,即都是以速度作为道路几何指标的控制参数。

设计速度方法最主要的缺陷是把复杂多变的公路行驶过程作为一个确定性问题来处理,即“车辆以设计速度沿道路中线行驶”。这种处理方式是借鉴于铁路线路设计,由于特殊的轮轨关系,机车行驶时轨迹与线路形态完全一致,不存在轨迹的选择与控制问题,并且火车司机是严格按照图定速度来控制机车行进,因此铁路建成运营之后列车的行驶受力状态与设计状态完全一致,这种设计假定对于铁路是完全没有问题的。相比之下,在公路上行驶时,汽车驾驶人是根据车辆前方道路的几何条件、交通状况、所驾驶车辆的运行状态以及自身的心理/生理感受来控制车辆的行驶轨迹和行驶速度的。大量的驾驶行为观测表明,设计速度方法的设计假定对于平原地区的高等级公路来讲有一定的适用性,因为此类道路线形平直,路幅宽敞,行驶速度波动不大。

而行驶环境为四车道以下的山区公路,特别是山区双车道公路,由于弯道密集,线形曲率变化丰富,路侧净空多变,车速沿行驶方向波动极大;并且由于车流稀少,除了行车道之外,驾驶人还会使用同侧的路肩和一部分对向车道,是在明显盈余的行驶宽度内选择行驶轨迹。因此,不同的驾驶习惯导致实际的轨迹形态和速度幅值呈现出明显的多样化特征,显著偏离“恒定速度加跟踪道路中轴线”的假想

驾驶模式,用此方法得到的几何线形与车辆、驾驶人较难匹配,从而可能导致严重的安全隐患,近年来中国各地持续发生的恶性交通事故已经证明了这一点。为了更好地贴近起伏地形公路的真实行驶状态,20世纪七八十年代国外学者提出了基于运行速度的路线设计方法,并为澳大利亚和多个欧洲国家所采用。该方法的核心是运行速度(第85分位行驶速度 V_{85})模型,近30年来,各国学者发表了大量的 V_{85} 统计模型,包括平曲线速度模型、直道速度模型和环境速度模型,这些模型反映了行驶速度与线形单元几何要素之间的关系。设计者将初拟路线的几何要素值依次代入 V_{85} 模型后可得到沿行驶方向变化的运行速度曲线,可以控制相邻线元指标值的平滑过渡,保证了几何设计的一致性和连续性,此外还可以运行速度来确定超高率和视距。由于这些优点,原本采用设计速度体系的中国、美国和加拿大等,也都在设计阶段增加了运行速度检验环节。

近年来,中国的相关机构和学者陆续开展了关于运行速度设计方法的研究,取得了一系列成果并建立了一套工程应用技术标准^[274],研究主要涉及双车道公路运行速度模型的建立与修正^[275]、运行速度条件下的平曲线半径取值、运行速度设计方法在山区低等级公路应用的适用性^[276]和用于运行速度设计的标准车型分类等。

4.2.2 近年提出的路线设计新方法

提高公路设计质量最理想的办法显然是在道路设计阶段认真贯彻“用真实的驾驶行为和车辆特性来控制道路几何设计”的设计理念,因此,在设计时必须充分考虑真实世界中驾驶人多样化的行为习惯,选取有代表性的典型驾驶模式,根据典型驾驶模式的汽车行驶特性来控制几何线形参数的选取,才能实现“人-车-路”系统的安全有效运行。为此,需要仔细衡量现行设计方法的合理性以及适用条件。与此同时,设计人员需要一种有效的手段来描述或预测车辆在连续弯道上的行驶状态,以实现复杂山区公路连续弯道的参数协同设计。当前严峻的交通安全形势急切要求我们对目前正在使用的路线设计方法做出改进或进行变革,并提出一种新的更能贴近真实行驶情况的山区公路路线设计理论。

区别于设计速度和运行速度这2种传统路线设计方法,近年来中国陆续有研究者提出了新的路线设计思路与方法。杨少伟等^[277]认为设计速度方法难以满足汽车行驶特性要求,容易出现各技术指标取值不合理,相互组合不协调,进而导致交通事故的

发生,为此提出了可能速度的概念、计算方法,基于可能速度的公路线形设计方法和流程,并通过调查分析与理论分析证明了可能速度图上的速差与交通事故的密切相关性,因此设计人员根据速度差能够对公路线形设计成果进行检查和修改。张景涛等^[278]根据可能速度计算公式求出了各设计速度的速差量,作为评价线形连续性的标准,进一步丰富和完善了可能速度设计方法。

符铎^[279]指出运行速度和可能速度线形设计方法存在普适性和增加工程经济成本的问题,在此基础上提出了理论运行速度概念,建立了一套理论速度预测模型和基于理论运行速度的路线设计及评价体系。

随着可靠度理论引入道路设计,颠覆了传统道路设计中定值设计的思想,通过建立设计指标极限状态下功能函数,将随机变量纳入路线设计考虑,使路线设计既灵活又更贴近于真实情况。朱兴琳^[280]运用可靠度对平曲线半径、竖曲线半径和停车视距进行了分析;陈富坚等^[281]结合公众心理承受度分析提出了平曲线半径可靠性设计的目标可靠度及可靠指标;游克思等^[282]考虑车辆作用分析了曲线路段行车安全的可靠性,并提出了平曲线可靠性设计流程;聂瑞红^[283]建立了平曲线半径、坡度与坡长的可靠度模型,分析得出了基于可靠度的路线参数合理取值。但总体而言,基于可靠度的路线设计方法还局限于对个别参数指标的探索,没有形成整套的设计指标体系和设计流程,值得进一步深入研究。

前述方法在一定程度上体现了驾驶人速度选择行为的影响,较设计速度方法是一个进步,但仍未考虑方向控制行为的影响,因为大量的案例表明很多事故是直接与方向控制(轨迹控制)的失控有关,单一的速度指标无法全面衡量出路线设计的安全性。徐进^[284]提出了一种新的山区公路路线设计理论,即基于“轨迹-速度”协同控制的公路平面线形设计新方法,其基本思想是“根据公路的等级、功能、线形条件和地形环境确定出代表性驾驶模式;在道路几何、行驶环境、车辆动力性、安全性、舒适性的约束下,决策出代表性方向控制模式的行驶轨迹,再根据轨迹曲率决策出代表性速度控制模式的行驶速度,最后同时使用轨迹和速度控制道路几何要素的取值”。该设计方法能够帮助设计者实现对全部平面和横断要素的调整和控制,成功解决了先前仅能调整弯道半径的困境,并且更贴近“用真实的驾驶行为和车辆特性来控制道路几何设计”的设计思想。

4.2.3 对规范和标准的修订以及旧路线形恢复

各国对几何设计中具体平、纵、横参数指标的研究重点略有不同。随着中国公路建设向山区发展,近年来对山区道路纵断面设计参数的选取进行了大量探索,标定了山区公路的坡度和坡长限制标准^[285],提出了不同平均纵坡条件下的长大下坡路段界定标准^[286],缓坡参数设置对不同车型的影响研究也取得了一定成果^[287];国外由于交通组成及地形上的差异,对纵断面极限参数并不敏感,而是对新型竖曲线型式设计、视距模型改进、竖曲线优化^[288]和基于宽容性设计理念的横断面以及路侧设计^[289]更为关注。

随着技术进步和实践发展,相关研究也对规范和标准的更新提出了新的思考和建议。张荣洁^[290]针对道路曲线间最小直线长度进行研究,指出中国相应的规范存在不足;程国柱等^[291]则对高速公路直线段的最大长度合理取值进行了研究;Gibbons等^[292]针对车辆前灯从封闭式前照灯发展到现代前照灯及前照灯安装高度变化的新情况,对 AASH-TO 规范^[293]中竖曲线的设计规定和视距计算提出改进建议。

随着旧路改建的增多,对现有道路线形参数的提取和恢复也成为路线几何设计中的一个研究热点。赵腊红^[294]在获得路面中点坐标的基础上,通过计算机辅助方法拟合平面线形参数并进行了精度分析;施金君等^[295]通过实测在 MATLAB 中实现了老路纵断面拟合,拟合精度均较好。但是通过实测获取大量路面点坐标是一项繁重的工作,因此,利用 Google 卫星图片处理技术, GIS, GPS 和移动检测车等方式提取旧路平面线形参数的研究相继开展^[296-298]。从研究成果来看,目前的这些方法都具有较高的精度,但是缺乏对道路纵断面线形的相关论述,虽然杨轸等^[299]采用 GPS 技术进行了道路平面和纵断面线形恢复的研究,但并没有给出相应结果的精度分析。因此,进一步深化平面线形参数恢复研究并开展纵断面线形参数恢复技术研究是下一阶段研究的重点和热点。

值得期待的是,随着北斗卫星在未来 10 年之内的陆续发射,中国将形成一个完善严密的卫星系统组网结构,继而向全球用户特别是中国用户提供高精度高质量的定位、测速和授时服务,届时,基于 GPS 定位的旧路线形恢复技术将会更加成熟并取得更高的精度。

4.3 道路智能选线及3D设计技术

4.3.1 道路智能选线及优化设计

道路路线的优化设计是保证道路设计质量的一项重要工作,目前已经开展的路线优化设计研究可以分为基于设计数据及算法的全路线自动优化和基于道路运行特性的路线设计手动优化。近年来,随着中国公路交通事业的发展以及人们思想观念的转变,公路路线设计目标从以工程经济为主要目标转变为安全、功能、经济、环保、美观和交通质量多目标协调,多目标的路线设计思维促使研究人员在设计理念、选线方法、设计指标确定及选用方法等方面开展了诸多专题研究。

全路线自动优化目前多以GIS平台结合遗传算法、进化算法等形式进行,优化目标逐渐从单一目标如总费用优化发展到多目标及非线性^[300]。由于山区高速公路的大规模建设,诸多研究人员从多个角度对山区高速公路的路线优化设计进行了研究,以多目标设计理念为指导,提出了山区高速公路路线方案设计原则及程序、方案比选因素及方法^[301],以及以公路路线设计中的某一影响因素为重点的选线方法研究,包括生态选线、环保选线、地质选线等方面的研究^[302]。优化内容也从单纯的平面线形优化或纵断面优化发展为平纵线形优化^[303]。道路路线设计涉及工程、经济、文化和社会等多方面,后续的路线自动优化技术应该更多地考虑如何将这些因素列入优化考虑的范围,例如Yang等^[304]提出的路线自动优化算法能够将专家对多个优化目标的相对重要性排列纳入考虑, Lee等^[305]的启发式优化算法将受平面限制区域作为影响因素实现了平面线形的优化。

基于道路运行特性的路线设计手动优化并不是单纯地从路线几何参数优化入手,而是综合考虑道路所处区位、功能、生态环保、交通特点等因素,对路线的走向设计、几何设计和景观设计等进行优化,弥补路线自动优化的不足。实践证明在山区公路选线中考虑环境影响及地质灾害优化的理论能够取得良好的综合效益^[306];从碳排放的角度审视路线几何设计并提出相应的优化建议也是一个值得进一步探索的领域^[307]。在计算机辅助优化还难以触及的领域,如何充分发挥设计者的主观能动性,优化设计出既符合安全性要求又具有环境友好性和美学观赏性的路线,是一个值得深入挖掘的问题。

路线优化设计的工具也从传统的CAD软件发展到利用Gobal Mapper, Google Earth等包含地理

信息的商业软件包,相关研究者对这些新工具在道路选线优化中的可行性展开了初步的研究,今后有望成为路线优化的有力工具。值得一提的还有澳大利亚Trimble公司的Quantm路线优化系统,这是一个基于S/C(服务端/客户端)架构的智能路线三维规划及优化软件,结合了卫星图像、航测和计算机自动优化系统,在澳大利亚及新西兰的公路与铁路建设中已经得到广泛应用^[308],中国也有工程项目委托该系统进行过优化,实践证明该系统的路线优化效果较为明显。

上述研究或提出多目标设计的原则和理念,或以某一目标为重点研究路线方案比选的方法,普遍存在的问题在于缺乏量化的数学手段对公路路线方案多目标达成度进行科学评价,因而对如何协调多目标之间的关系也停留在定性描述的层次上。为克服这一缺陷,相关学者采用多目标优化及决策的数学方法对路线方案进行科学的优选与评价。而公路路线方案决策问题具有设计目标不可公度性和目标间的矛盾性两大特点。不可公度性是指各个目标没有统一的度量标准,因而难以比较。矛盾性是指如果采用某一种方案去改进某一目标值,可能会使另一目标的值变好或变坏。这2个特点决定了将多目标问题转化为单目标问题存在困难,因而出现了采用多目标优化与评价方法解决路线决策与优化的研究。近年来,许多学者意识到解决路线方案多目标优化问题的最终手段是在各子目标之间进行协调权衡和折衷处理,求解路线优化问题实际上是求解一组满足约束条件的各目标均衡解,而不是单个的全局最优解,因而在决策方法上采用了基于Pareto最优解集的多目标进化算法、多目标非线性优化方法等方法,解决了路线方案优化的数学模型问题。

随着路线设计理念从以经济为主转向多目标协调,对路线方案评价的研究也转向多目标评价方法研究。在评价方法上,提出了基于AHP-GRAP的评价方法^[309]等多种方法。但在评价指标的选择及指标权重的确定方法上,依然依赖专家打分的方式确定,说服力不强。

4.3.2 道路三维设计

现行的平、纵、横三阶段设计流程容易导致设计在实际运营中产生不一致性,三维设计则可以在设计阶段就避免这个问题,目前相关的研究主要包括路线三维设计流程与方法 and 基于三维设计的视距计算等两方面。各国对三维设计的研究侧重有所不同,中国研究者更重视三维虚拟场景的构建及可视

化技术^[310],并未对路线三维设计方法进行系统梳理;Kuhn等^[311]则从三维设计、仿真、参数输出与评价等方面构建了完善的路线三维设计体系。三维视距的计算在各国都有较多的研究, Kim等^[312-314]分别采用薄板样条函数、空间几何向量关系等方法对不同线形组合条件下的三维视距进行计算,廖军洪等已经将该方法用于多个高速公路安全评价项目,研究成果相比国外学者的研究具有更强的说服力。

4.4 道路交叉设计

4.4.1 立交设计

近年来,关于立交几何设计的研究主要集中在变速车道长度^[315]、集散车道设置^[316]、互通立交最小间距^[317]及连续匝道口之间的交织长度、车辆运行情况^[318]等方面,这些研究成果对规范中的规定起到了解释和深化的作用。关于互通式立交技术指标的合理应用一直是研究和工程中的热点,随着公路立交向山区的延伸,有研究者对山区高速公路立交的主要技术指标进行了研究^[319],对山区高速公路立交的最小间距长度取值提出建议^[320],在山区特殊条件下提出了“群布型”立交^[321]、“展线型”立交^[322]、“约束型”立交^[323]的概念,并对这几种互通式立交设计的关键技术进行了研究,丰富了立交设计的内涵。

在中国近几年的工程设计实践中,在满足链接功能和指标限制的前提下,如何选择立交结构形式以及如何布置匝道线形来实现占地最小以及节省工程费用等目标,一直是设计人员所最关心的,其中螺旋式立交匝道是近年来道路设计人员在小范围大高差条件下热衷于使用的一种结构形式。

研究者对新型立交的兴趣也很浓厚, Berry等^[324]提出了一种适用于窄桥处的FRE(Free Range Eagle)立交并进行了仿真,指出该立交形式在提高通行能力的同时并未明显降低驾驶人的驾驶体验水平; Moon等^[325]提出了用于高速公路连接的Nano立交型式,通过仿真对运营、安全、建设费用和占地等做了相应评价,指出其适用性;张谦等^[326]提出了一种无交织环形立交的设计概念,这些新型立交的提出为后续的研究及工程实践提供了新思路。

4.4.2 平面交叉口设计

常规平面交叉口的几何设计主要体现在左转车道几何参数研究和右转车道长度的确定上。环形交叉口改进研究也有一定进展,最近的研究涉及涡轮式环形交叉口的几何设计、通行能力分析等,指出了其在中国应用的适用条件。高敏等^[327]对现代环形

交叉口与传统环形交叉口进行了比较,明确了现代环形交叉口设计要点和自行车道安全性设计方法。

非常规交叉口设计方面, Hummer教授是国外较早致力于各种非常规交叉口设计与应用的学者,其近年来对主路优先交叉口 Superstreet 的改进做了相关工作,并就如何在实际设计中利用不同形式非常规交叉口的灵活性做了比较^[328]; Hochstein等^[329]提出了J形回转交叉口的设计指南和安全评价方法; Hughes等^[330]总结了错位左转式、U形掉头直行式、远引掉头左转式和单象限集中左转式等4种非常规交叉口的几何设计要点、安全及运营效果评价,对我们有一定的启示意义。

中国学者陈军近年来也提出了一种新的双层平面交叉口型式,并对其信号控制和通行能力作了初步分析,但是并未进行相应的几何设计研究,在后续工作中可以进一步展开^[331]。交叉口设计评价一直以来都是事后型评价,孙剑等^[332]提出了城市道路交叉口设计质量控制模型,实现了在设计过程中对交叉口设计质量进行评估,显著提高了平面交叉口设计的效率和效果。

4.5 面向路线设计的汽车行驶特性预测技术

4.5.1 汽车行驶轨迹/行驶速度的特性研究和预测

对公路路线设计至关重要的控制参量主要有3个,分别是汽车行驶轨迹、行驶速度和驾驶操作行为(包括转向行为、制动操作以及加速操作)。其中,汽车行驶轨迹和行驶速度不但是车辆运动状态以及行驶稳定性的直接衡量指标,还是驾驶人操作行为在车辆运动学层面上的反映和最终表现,因此,这2个参量既可以描述车辆运动学状态又可以描述驾驶人行为。在线形设计阶段,汽车行驶轨迹和行驶速度一方面是几何要素值的直接计算参数,另一方面也是衡量公路几何线形设计质量和行驶安全性的重要评价标准。因此,对所设计公路的汽车轨迹和速度进行准确合理的估计和预测,将决定着公路建成以后的行驶质量以及运营安全性是否能够得到保证。可见,轨迹/速度预测技术既是公路线形设计理论与方法的重要支撑和一个主要分支,同时也是公路线形安全评价体系与技术的不可或缺的组成部分。

(1) 行驶轨迹偏移特性

在实际的道路行驶过程中,很大一部分驾驶人为了实现快速驶过弯道的目的,会充分利用路幅宽度,从而能够在可行驶路面区域内选择一个较大的轨迹半径,因此,行驶轨迹与行车道中线并不一致,即轨迹与行车道中线之间存在一个侧向偏移值。但

直到进入 21 世纪,轨迹的偏移特性及其对行车安全性的影响才引起研究者特别是中国学者们的充分重视。

Spacek^[333]对公路行驶场合汽车轨迹偏移特性的研究是开创性的,他根据弯道范围内轨迹与行车道中心线之间的相对横向位置变化,将双车道公路轨迹分为理想、正常、摇摆、矫正、漂移和切弯 6 类,这种分类方式为其他学者所开展的后续研究提供了研究思路和研究模式。任园园^[334]观测了小客车、货车和大客车在双车道公路行驶时的轨迹偏移值,并借鉴了 Spacek 的分类方式,对每一类行驶轨迹曲线建立了基于最大偏移值和曲线起点偏移值的极坐标数学方程。林雨等^[335]使用喷液、路面横向刻线以及行车仿真等手段获得了弯道范围内的轨迹横向偏移值,分析了横向加速度、缓和曲线长度以及曲率变化率与轨迹横向偏移值之间的相关性,并建立了统计回归模型,为缓和曲线长度以及曲线路段加宽提供了控制依据。

徐进等^[336-337]使用“人-车-路”协同仿真手段开展了弯道行驶试验,发现驾驶人在转角不大的小半径弯道上采用切弯行驶更容易达到舒缓轨迹的目的,并且弯道越短或路幅越宽,切弯效果越显著;他的研究还表明,回旋线会使切弯行驶时的轨迹变得舒缓,从而解释了有回旋线的弯道为何伴随着较高行驶速度的原因。

(2) 行驶轨迹预测技术

汽车行驶轨迹预测一直是智能车辆和驾驶仿真等领域的研究热点。近年来,由于“人-车-路(环境)”协同设计思想在道路设计中日益被强调,如果在设计阶段能够预测出汽车在所设计道路上的行驶轨迹,则能够在很大程度上衡量出“人-车-路”系统是否能安全、有效运行,因此,汽车行驶轨迹预测技术将是未来很长一段时间的研究热点。

郭健^[338]和管欣等^[339]分析了可行驶区域、驾驶负担以及交通法规对驾驶行为的影响,设计了轻便性、安全性、合法性等评价指标并建立了每个指标的隶属度函数,前后经历了模糊规则、网格法以及粒子群 3 种轨迹点求解算法,逐步提高了求解的稳定性、收敛性以及全局优化能力,但他们的研究主要是针对车辆换道和城市道路跟车行驶场合,而非复杂线形条件下的公路行驶轨迹决策。

Prokop^[340]使用多目标优化方法来决策汽车行驶轨迹,先是建立能描述典型驾驶人行为的目标函数,并将与轨迹相关的决策变量包含在目标函数内,

然后根据实际的车辆动力性能、行驶稳定性要求以及道路边界限制来建立约束条件,最后使用数学规划方法迭代得到计算周期内的行驶轨迹。

鉴于现有的轨迹决策研究主要是针对城市道路的换道和编队行驶工况,无法应用于山区道路,文献^[284]中研究了公路复杂线形、车辆性能以及交通特性等因素对轨迹决策行为的影响机制,提出了“前视断面选点”的计算策略,建立了典型驾驶模式的轨迹决策模型以及前视轨迹点的滚动时域求解算法,能够得到复杂山区道路和赛道的行驶轨迹曲线,进而实现了轨迹冲突辨识、轨迹离散度检测、轨迹侵入辨识以及轨迹与道路几何的吻合度分析。

(3) 汽车行驶速度的特性研究和预测

道路平面线形可以看作是直线和曲线的组合,因此基于平面线形的速度模型可以分为平曲线模型和直道模型 2 种。由于汽车曲线行驶会受到侧向力作用,更容易出现侧翻、侧滑和对撞事故,曲线的几何设计更容易引起研究者的重视,因此,平曲线模型的比例占近年来发表成果的绝大多数。自 20 世纪 80 年代以来,各国的学者们通过公路特征断面的速度实测数据建立了数量众多的平曲线运行速度统计模型,这些模型中的大多数都是单要素模型,常用的自变量包括弯道半径和曲度,由于曲度是弯道半径的变形,因此弯道半径是最普遍采用的模型自变量。

由于单要素模型中只包含 1 个公路几何设计指标,如弯道半径,使用这类模型时设计者仅能对弯道半径进行调整,局限性非常大,因此有一些学者开始尝试建立包含 2 个及 2 个以上几何要素的多要素模型,以实现更多几何要素的设计控制。这类模型又可以分成 2 类,第 1 类是只包含 1 个自变量,但自变量要通过多个几何参数才能计算,比如曲率变化率和曲线长度;第 2 类直接包含多个自变量,比如徐进等^[341]在其提出的模型中引入了弯道转角影响因子和路幅宽度影响因子,使其模型中共包含弯道半径、转角和可使用路幅宽度 3 个自变量;Memon 等^[342-344]也发表了此类模型。

Crisman 等^[345]和 Dell 等^[346]分别提出了各自的直道行驶速度模型,有趣的是,二者的模型都采用了车道宽度和曲率变化率这 2 个自变量,并且都是线性结构,贺玉龙等^[347]也发表了直线路段稳定速度模型。

由于山区地表的自然坡度远远超过汽车能够正常行驶的坡度界限,需要在平面、纵面和横断面之间进行精细、巧妙的平衡,才能使路线设计能够满足汽

车行驶要求,纵断面设计一直是山岭重丘地区公路设计的重要内容。近年来各国公路领域的学者开展了大量的相关研究工作,建立了纵坡路段或是弯坡组合段的行驶速度模型。根据建模手段以及数据获取来源,可以将纵坡路段的汽车速度模型分为2类:

第1类是基于数据回归方法的统计模型。如中国2004颁布的《公路项目安全性评价指南》给出了小客车和大货车2种车型在平曲线单元上的 V_{85} 统计模型,而当曲线路段单元位于纵坡上时,根据坡度值和坡向对速度进行修正^[348];Bucchi等^[349]针对双车道公路的弯坡组合路段建立了小客车在曲线入口、曲线中点和曲线出口的速度回归模型,但模型并没有包含与纵坡有关的自变量;而Gibreel等^[350]所建立的小客车弯坡组合路段运行速度回归模型,则包含了比较多的纵断面设计因素比如竖曲线半径、坡度差、竖曲线曲率等,因而可以帮助设计者实现对纵断面要素的取值控制;许金良等^[351]开展了二级公路纵坡路段小客车和大货车的速度观测,依据观测数据建立了2种车型在坡顶、坡中和坡底3个断面的速度预测模型;邓云潮^[352]也采用类似的方法建立了小客车的坡道速度预测模型。

第2类是基于行驶力学来求解汽车在纵坡路段的行驶速度。研究者将汽车行驶时的受力分解成空气阻力、轮胎滚动阻力、坡道阻力、加速阻力和发动机输出的驱动力,而汽车行驶时(不管是变速还是匀速)前四者的合力与驱动力大小相等,基于这一力学特征,可建立汽车行驶方程式,对其进行解算,即可得到某一时间点上的行驶速度。荣建^[353]所建立的模型是其中比较有影响力的,该模型的核心是引入了单位质量比功率 P ,并且建立了 P 与速度、坡度和坡长的函数关系,对模型方程式进行迭代解算即可得到每一仿真步长对应的纵坡速度值。符铨砂等^[354]也建立了基于行驶动力学理论的高速公路纵坡路段货车速度预测模型,能够得出货车爬坡和下坡的速度曲线,可为山区高速公路的线形设计安全性评价提供参考。

由于车辆操作行为很大程度上是驾驶人对视觉信息的反映,因此弯道上的速度选择行为必然受到行车视距的影响,为此,杨志清等^[355]提出了空间视距的概念,给出了基于三维带状道路的空间视距计算方法,建立了基于空间视距的运行速度模型。绝大多数的运行速度模型没有考虑对运行速度影响较大的交通流因素和限速因素,而Himes等^[356]将这2个因素纳入考虑,提出了相应的运行速度预测模型。

运行速度方法中一个重要的步骤是相似路段的划分,Garcia等^[357]提出了一种基于惯性运行速度的相似路段划分方法,较有新意。

国外应用较多的还有交互式道路安全设计模型IHSDM中的运行速度预测模块^[358],从该模块在哥伦比亚、意大利和巴西等国家的应用情况来看,还需要根据当地不同的条件进行相应修正,才能达到使用要求。对路线设计一致性的后续研究可以从以下2个不同方面继续开展,一是考虑更多影响运行速度的因素,二是对IHSDM模型在中国的应用进行修正研究。

4.5.2 面向道路几何设计的场景漫游和驾驶仿真技术

为了弥补平纵横分开设计以及计算假定过于简化的不足,设计人员在早期通过逐帧播放断面透视图来检查线形设计是否与驾驶人的视觉特性相匹配,并以此评判线形设计的优劣。但这一方法不久便被道路漫游技术所取代。近年来,GIS技术开始被引入到道路漫游系统中,道路沿线两侧很宽范围内的地形和地物可以考虑进来,并进行实时渲染,设计者可以对道路-环境、道路(环境)-驾驶人的协调性进行评价。但由于没有引入车辆模型,该系统不太适用于对路线设计的车辆行驶适应性进行评价。

近年来,一些学者开始使用一些原本面向车辆设计的仿真手段来开展道路行驶安全性研究。由于是以车辆动力学响应作为道路设计质量的评价指标,构建较高精度的整车模型非常重要,车辆模型由最开始的2自由度,历经了4,7,9,12直至数百自由度。在建模和解算方法上,多体动力学方法已经取代了基于经典力学的拉格朗日方程和牛顿-欧拉方法,因此,目前最常用的车辆动力学分析软件比如dSpace,ADAMS,LMS Virtual Lab Motion等都是使用多体方法进行解算。徐进等^[359],邵毅明等^[360],杨宏志等^[361]都分别开展过基于ADAMS软件二次开发的道路几何安全性设计仿真研究。

驾驶模拟器技术也是被广泛应用于道路设计安全性设计的一种辅助手段。试验者根据屏幕上的虚拟道路环境做出反应,操纵执行装置来实现车辆位置的控制,从而得到车辆行驶响应。根据工作环境的真实度,驾驶模拟器可以分成敞开舱式、固定封闭舱式和运动封闭舱式,其中运动式驾驶舱能够提供更真实的模拟驾驶体验,因为驾驶舱是被固定在有升降、平面转动、侧倾转动、俯仰和平面运动等多个自由度的台架上,当有制动、加速、曲线行驶等工况

时,台架便发生相应的运动并最终将这种体验传给试验者。目前,同济大学、长安大学、吉林大学等高校以驾驶模拟器为手段开展了大量的道路安全性仿真研究。

驾驶模拟器与完全基于计算机的行驶仿真的差别在于前者由真人操纵车辆行驶,而后者是由驾驶人模型完成。在目前驾驶人行为尚未完全被认识清楚的情况下,驾驶模拟器的可靠性更高,但高精度封闭式模拟器的价格相当昂贵。而纯计算仿真由于完全数学模型化,植于PC上也能够良好运行,在驾驶人模型相对有保证的情况下仍是一种非常重要的分析手段,并且,随着对驾驶人车辆控制行为的不断认识,驾驶人模型必将更加精确合理,届时计算机行驶仿真的应用空间会更大。

4.6 道路几何设计质量的评价方法、指标及其标准

4.6.1 基于指标参量的设计质量评价

这里的几何设计评价对象是指施工图阶段的路线设计方案或已运营道路,而非选线阶段的路线走向方案,所关心的是道路的行车安全性、驾驶舒适性和服务水平,而能够表征行车安全的设计一致性评价一直是重中之重。设计一致性是指几何设计与驾驶人的期望速度要相适应,线形要素的改变应与驾驶行为相匹配,更好的一致性对应更好的道路运营安全性。一致性评价指标主要有运行速度、线形指数、视觉特性、车辆动力学指标和驾驶人的心理/生理指标等。

基于汽车行驶速度曲线的几何一致性评价是近20年来最常使用的一种评价手段,应用这种方法时设计一致性体现为汽车行驶速度在相邻线元之间的速差变化应在可接受的范围之内,如果速差超出阈值,则需要调整相邻线元要素的取值。作为评价介质的行驶速度一般情况下是运行车速,也可以是文献[277]中杨少伟提出的可能速度,或是文献[284]中用决策方法给出的代表性驾驶模式的行驶速度,当选择运行速度为介质时,速差阈值一般采用欧美的研究成果,即 $18\sim 20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 。需要注意的是,欧美是以双车道公路的历史事故数据为分析对象,而中国却将这一速差标准直接用于四车道以上的高速公路线形评价,效果难以保证。

线性指数方法认为当单个设计要素值与整个路段的平均值偏离较大时,路线设计一致性则可能存在问题,常用的指标有弯道最大最小半径之比、平均半径、平均直线长、曲线比例、平均坡度、竖曲线平均曲率、曲率变化率等。该方法的优点是可以对线形

整体的一致性水平有所把握,并且具有广泛的使用范围,比如能够同时应用于二、三、四级公路,但要找出局部线形设计中的缺陷和瑕疵却无能为力,同时对一些局部指标的调整不敏感,所以其更适用于宏观评价,而非微观的局部线形要素改进。此外,FHWA的事故统计验证结果表明,在各个线形指数中,尚没有一个能像速差那样呈现出与事故率的强相关关系,所以该方法被建议作为速差的辅助手段^[362]。

基于视觉的评价方法经历了透视图、三维动画、以及场景仿真3个阶段。由于一直以来的路线设计习惯是平、纵、横分开考虑,而行驶时映入驾驶人眼帘的是空间路面三维形状,所以视觉评价方法最主要的作用还是为设计者提供一个三维设计效果图,以便对设计方案的适人性有一个整体的把握。该方法能检查出一些不良的线形组合比如跳跃、板桥、暗凹、扭曲,或者视距不良等。视觉方法的评价结果完全取决于人的主观判断,由于缺乏定量的标准,这些方法更适用于几组设计方案之间的优选和比较,或者单个设计修改后的再评价。

由于驾驶人是公路行车过程中的决策环节,车辆事故致因中人的失误占主要部分,因此研究驾驶过程中人对公路运行环境的反应特性非常必要。用于反映驾驶人心理/生理负担的指标通常有心率变异、血压/脉搏变异、皮肤静电、肌电流、瞳孔径、视点分布范围、眼球转速、视线需求等。为了获得这些参量,身上安装有测量仪器的驾驶人要在道路上操纵车辆或是在显示有道路场景的屏幕前模拟驾驶。研究者主要通过构建出心理/生理指标与线形元素(如半径、转角、坡度)之间的变化关系^[363-364],进而描述驾驶负荷水平,但目前尚不清晰驾驶负荷是如何影响道路安全水平的,如何选择合适的指标组合来准确描述驾驶负荷也是一个问题,并且现有的研究结论大多支持用高标准的路线设计,这对于山岭区二级以下的公路设计不太适用。

现代道路的主要用途是供汽车行驶,因此在道路设计阶段进行汽车的虚拟行驶试验,仿真后提取汽车在行驶过程中各种关键响应参量的时间历程曲线,能够准确辨识出汽车行驶不稳定、驾驶人操纵困难以及行驶不舒适的路线位置,从而进行有针对性的几何设计改进;并且使用仿真手段还可以反复进行路线修改方案的仿真行驶试验,检验调整效果直至得到满意的设计。徐进等^[365-367]全面介绍了基于行驶动力学仿真的道路设计质量评价方法体系,涵盖了行车安全性检验、驾驶负荷检验、行驶舒适性检

验等多项内容,以及实施这些检验所涉及的汽车动力学指标和操纵输入量指标。

4.6.2 基于事故预测模型的安全性评价

跳出设计者视角,由事故可能性的角度对道路路线设计的安全性进行评价是一种较为客观的方法。事故预测模型通过定量的方式对安全性给出相应结论,道路安全审计则是以清单的方式对安全性进行定性评价,需要指出的是本文中所提及的事故预测模型是指特定道路考虑几何设计因素的微观事故预测模型。

孟祥海等^[368]结合几何线形指标和有限的数据调查对山区高速公路做了安全评价;Findley等^[369]将平曲线位置纳入安全分析模型,结果表明,平曲线位置对安全有显著影响;Fu等^[370-371]分析了事故率与道路纵坡坡度、坡长的关系,上述评价方法及相应研究成果对平面线形和纵面参数均提出了优化和设计指导意见。游克思等^[372]建立了路侧危险指数用于评价路侧安全,指出了横断面参数设计对安全的影响;Shumaker等^[373]建立了事故严重性指数与路堤横断面几何设计参数(边坡坡度、填土高度)、交通量和限速值等的回归关系,用于评价不同道路的横断面设计质量;Meesit等^[374]调查分析了有突起路缘石的中间带和划线中间带对驾驶人压力的不同影响;赵一飞等^[375]通过实测调查分析了高速公路路缘石形式、侧向净距与车速之间的关系,对中国中央分隔带的设计提出了建议。

国外对事故预测模型的研究开展较早,数据积累等基础条件也较好,因此除了对公路的事故预测模型^[376]进行研究以外,还细化到城市道路、交叉口、行人等多方面的事故预测,所完成的工作对中国相应研究的开展有借鉴意义。近年来,结合中国实际情况和事故数据积累,钟连德等^[377]通过对中国10余条高速公路数据的调研,建立了高速公路事故预测模型。但是,由于不同地区数据完整性及质量方面的原因,中国事故预测模型的研究和应用存在很多局限性,今后应在加强数据积累的基础上进一步完善优化模型,以使其能够更好地服务于道路设计。

上述预测模型都是针对公路的基本路段或是平交路口,道路立体交叉由于其特殊的行驶环境和几何线形结构,其事故的分布位置和发生概率显然有明显的差异,因此需要单独建立事故预测模型,目前开展此类研究的都是国外的机构和学者^[378]。

4.7 目前研究存在的问题及热点展望

(1)目前绝大多数的平曲线 V_{85} 模型只含半径 R

一个自变量,所以只有 R 才能够被调整。但实际上,偏角、偏转方向、路宽、回旋线等都能影响驾驶人的速度选择行为,因此,需要将更多的几何要素反映进来。并且,对于弯道密集的山区公路,相邻弯道之间的驾驶行为和车辆运动学存在明显的耦合,因此合理的模型应该将这一特性考虑进来,以实现整条道路的协同设计。

(2)不管是设计速度方法还是运行速度方法,在求解汽车横向受力时都是将弯道半径 R 作为计算参数,即相当于采用了“行车道内居中行驶”的假定驾驶模式,但居中行驶方式在真实山区公路上的比例非常低,显然不能因为其合法就将其作为设计假定并用其控制线形参数的取值,因此应该深入调查各类山区公路的驾驶行为,选取代表性的驾驶模式,并在设计时重点考虑。

(3)使用汽车运动学方程式来计算纵坡路段汽车行驶速度时,只要车辆的动力学参数相同,计算结果都一样。但根据现场实测结果,只有重载车辆连续上坡行驶并且坡度值较大时,不同车辆的运动学表现才会比较一致;而下坡、平坡和缓坡行驶时,车辆的运动学表现不再受制于汽车动力性能,因此,不同的驾驶习惯会导致非常明显的速度差异。

(4)目前有为数不少的关于轨迹偏移特性的研究成果,但这些成果大多尚未达到能够直接指导公路几何线形设计的程度,设计者目前尚无法根据这些成果来控制几何要素值的选取。因此,须深入开展轨迹偏移特性与汽车行驶安全性、通过性、驾驶人主观意愿之间的相关性研究。

(5)在以后的研究中需要深入分析公路线形、车辆性能、交通特性等因素对轨迹决策行为的影响机制,明确山区公路的代表性驾驶模式,建立相应驾驶模式的山区公路汽车行驶轨迹决策模型,为构建新的山区公路设计理论与方法提供技术支撑。

(6)弯道行驶时,汽车行驶轨迹与行驶速度之间存在着非常紧密的耦合关系,但目前关于“轨迹-速度”耦合机理方面的研究却非常少,因此开展“轨迹-速度”协同作用研究是以后的一个主要发展趋势。

(7)公路路线在进行多目标设计、优化、评价过程中,尽管先进的数学方法提供了优化与评价的模型和手段,但由于路线设计目标与设计指标之间的关系仍然存在着不清晰之处,因此定性描述的成分远多于定量评价和分析。研究者需要进一步明晰路线设计目标(安全、经济、生态、景观等)与路线几何设计指标之间的关系。

(8)三维设计、路线优化及新一代CAD技术。路线几何设计理论体系已经从单一的设计速度法发展出较多其他形式的设计理论,但还是将道路设计划分为平、纵、横三阶段,随着三维设计思想和建筑信息模型BIM技术日趋成熟,应该逐步建立起完善的道路三维设计理论和方法体系(包括三维设计和评价指标、三维优化算法等),将道路路线设计从二维平台带入三维平台,这必将大大提高路线设计的效率和水平,同时对提高道路运营安全性也有重要意义。

(9)特定区域的路线设计方法与技术。山区:中国的公路建设重心已经开始转向中西部自然条件复杂多变的山区,在总结既有山区道路建设经验的基础上,发展一套适合于山区公路的路线设计方法(包括设计指标选用、新型立交适用性、考虑地质和景观的路线优化设计等)是今后一段时间需要完成的工作。快速城镇化区域:随着中国大力推进城镇化进程,部分经济发达地区已经出现公路逐渐演变为穿越城镇道路的现象,但中国目前的公路与城市道路设计执行2套标准,如何在公路设计时从设计速度、平面线形及横断面布置等标准方面预留这种演变空间,以适应城镇化趋势,是一个亟需解决的重要问题。此外,从规范设置的角度研究郊区公路和城市道路过渡段的路线设计标准的融合也有很强的现实意义。

(10)考虑生态环保、节能减排的路线设计。在路线设计中将碳排放、油耗等指标纳入优化目标,进一步落实与自然环境协调,突出当地文化特色等原则,实现可持续发展路线设计。

(11)道路的细化设计。在平面交叉口、立交匝道加宽、立交出入口间距、加减速车道长度、视距、非机动车道、人行道等设计方面,仍有进一步研究的空间。

策划与实施

总策划:马建

总组稿:孙守增,杨琦,赵文义

组稿:王磊,马勇,刘辉,张伟伟,陈红燕,陈磊

致谢

本文在成稿过程中,得到以下人员的协助,特致谢忱!

撰写(以姓氏笔画为序):马磊,毛雪松,刘保健,张洪亮,杨宏志,陈仁朋,陈昌富,季节,俞建霖,郝培文,徐进,谈至明,崔新壮,曹文贵,章定文,黄卫东,

傅鹤林,程建川,蒋应军,韩森

统稿:翁效林,张增平,徐进

参考文献:

References:

- [1] 魏静,蒲兴波,钱耀峰,等.基于动量BP算法的过渡段路基沉降预测[J].北京交通大学学报,2012,36(1):52-55.
- [2] FUJIKAWA K, MIURA N. Field Investigation on the Low Embankment Due to Traffic Load and Its Prediction[J]. Soils and Foundations, 1996, 36(4): 147-153.
- [3] 凌建明,王伟,邬洪波.行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J].同济大学学报:自然科学版,2002,30(11):1315-1320.
- [4] ABDELKRIM M, DE BUHAN P, BONNET G. A General Method for Calculating the Traffic Load-induced Residual Settlement of a Platform, Based on a Structural Analysis Approach[J]. Soils and Foundations, 2006, 46(4): 401-414.
- [5] 耿大新,钟才根,郑明新.交通荷载作用下软土路基残余变形的研究[J].华东交通大学学报,2007,24(4):46-50.
- [6] 李进军,黄茂松,王育德.交通荷载作用下软土地基累积塑性变形分析[J].中国公路学报,2006,19(1):1-6.
- [7] LI D, SELIG E T. Cumulative Plastic Deformation for Fine-grained Subgrade Soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(12): 1006-1013.
- [8] 崔新壮.交通荷载作用下低路堤软粘土地基累积沉降规律分析[J].中国公路学报,2009,22(4):1-8.
- [9] 黄茂松,李进军,李兴照.饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J].岩土工程学报,2006,28(7):891-895.
- [10] 崔新壮.交通荷载作用下黄河三角洲低液限粉土地基累积沉降规律研究[J].土木工程学报,2012,45(1):154-162.
- [11] CHAI J C, MIURA N. Traffic-load-induced Permanent Deformation of Road on Soft Subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(11): 907-916.
- [12] 高俊启,施斌,张巍,等.分布式光纤传感器用于桥梁和路面的健康监测[J].防灾减灾工程学报,2005,25(1):14-19.
- [13] 荆创利,刘琪,张超.D-InSAR技术在地面沉降监测中的应用[J].四川建筑,2007,27(6):102-105.
- [14] 母景琴,姚国清.干涉雷达时间序列分析方法在地面沉降监测中的应用[J].国土资源遥感,2007(3):28-

- 30.
- [15] WANG Z L, LI Y C, SHEN R F. Correction of Soil Parameters in Calculation of Embankment Settlement Using a BP Network Back-analysis Model[J]. *Engineering Geology*, 2007, 91(2/3/4):168-177.
- [16] 黄琴龙, 凌建明, 唐伯明, 等. 旧路拓宽工程的病害特征和机理[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2004, 32(2):197-201.
- [17] 贾宁, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 杭甬高速公路拓宽工程理论分析及监测[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(6):755-760.
- [18] RICHARD J D, CHRISTOPHER S H, PHILIPPE B. Embankment Widening Design Guidelines and Construction Procedures [R]. West Lafayette; Purdue University, 1999.
- [19] 陈建峰, 俞松波, 叶铁峰, 等. 软土地基加筋石灰土路堤离心模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27(2):287-293.
- [20] 谢永利, 潘秋元, 曾国熙. 应用离心模型试验研究软基变形性状[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(4):45-50.
- [21] 汪浩. 新老高速公路结合部处治技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2003.
- [22] 孟庆山, 孔令伟, 郭爱国, 等. 高速公路高填方路堤拼接离心模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(3):25-29.
- [23] ALLERSMA H G B, RAVENSWAAY L. Investigation of Road Widening on Soft Soil Using a Small Centrifuge [J]. *Transportation Research Record*, 1994, 1462:47-53.
- [24] FORSMAN J, UOTINEN V M. Synthetic Reinforcement in the Widening of a Road Embankment on Soft Ground[C]//BARENDT F B J, LINOENBERG J, LUGER H J, et al. Proceedings of the Twelfth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Rotterdam; Balkema, 1999:1489-1496.
- [25] 周志刚. 老路拓宽设计方法的研究[J]. *长沙交通学院学报*, 1995, 11(3):50-56.
- [26] 周志刚, 郑健龙. 旧路拓宽设计中的有限元分析[J]. *力学与实践*, 1995, 17(5):18-20.
- [27] 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.
- [28] 傅珍, 王选仓, 陈星光, 等. 新旧地基不同固结程度对拓宽路基差异沉降的影响[J]. *公路*, 2008(5):10-12.
- [29] 王涛, 崔新壮. 等级路改建高速公路引起的地基沉降规律研究[J]. *公路与汽运*, 2008(2):81-83.
- [30] 崔新壮, 商庆森, 姚占勇. 强夯在威乳高速公路改建工程中的应用研究及一般性推广[J]. *山东大学学报: 工学版*, 2008, 38(4):53-56.
- [31] 凌建明, 钱劲松, 黄琴龙. 路基拓宽工程处治技术及其效果[J]. *同济大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(1):45-49.
- [32] 高成雷, 凌建明. 旧路拓宽地基差异沉降形成机理及控制对策[J]. *公路交通科技*, 2008, 25(5):28-33.
- [33] 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.
- [34] 周虎鑫. 软土地基上修筑高等级公路工后沉降指标的研究[D]. 南京: 东南大学, 1993.
- [35] 何兆益, 周虎鑫. 高等级公路软土地基容许工后不均匀沉降指标研究[J]. *重庆交通学院学报*, 1996, 15(1):48-54.
- [36] 张敬沛, 陈星光. 拓宽路基工后差异沉降控制标准与分级[J]. *路基工程*, 2008(4):80-81.
- [37] 贾宁. 软土地基高速公路拓宽的沉降性状及处理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [38] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [39] BISHOP A W. The Use of the Slip Circle in Stability Analysis of Slopes[J]. *Geotechnique*, 1955, 5(1):7-17.
- [40] CHEN W F. Limit Analysis and Soil Plasticity[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing, 1975.
- [41] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [42] DONALD I, CHEN Z Y. Slope Stability Analysis by an Upper Bound Plasticity Method [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, 34(11):853-862.
- [43] 陈祖煜. 土力学经典问题的极限分析上下限解[J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(1):1-11.
- [44] 黄润秋, 许强. 地质灾害过程模拟和过程控制研究[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [45] 秦四清. 斜坡失稳的突变模型与混沌机制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(4):486-492.
- [46] 陈昌彦, 王思敬, 沈小克. 边坡岩体稳定性的人工神经网络预测模型[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(2):157-161.
- [47] 杨杰, 胡德秀, 吴中如. 基于最大熵原理的贝叶斯不确定性反分析方法[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2006, 40(5):810-815.
- [48] 石刚, 支喜兰, 谢永利, 等. 冲击压实和强夯加固地基效果分析[J]. *交通运输工程学报*, 2006, 6(4):52-56.
- [49] 龚晓南. 高等级公路地基处理设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

- [50] 刘松玉,易耀林,朱志铎.双向搅拌桩加固高速公路软土地基现场对比试验研究[J].岩石力学与工程学报,2008,27(11):2272-2280.
- [51] 刘松玉,朱志铎,席培胜,等.钉形搅拌桩与常规搅拌桩加固软土地基的对比研究[J].岩土工程学报,2009,31(7):1059-1068.
- [52] 刘松玉,易耀林,杜延军,等.变径搅拌桩处理成层软弱地基的现场试验[J].中国公路学报,2012,25(2):2-8.
- [53] 刘汉龙,费康,马晓辉,等.振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其在应用(I):开发研制与设计[J].岩土力学,2003,24(2):164-168.
- [54] 郑刚,龚晓南,谢永利,等.地基处理技术发展综述[J].土木工程学报,2012,45(2):127-146.
- [55] 曹卫平,陈仁朋,陈云敏.桩承式加筋路堤桩体荷载分担比计算[J].中国公路学报,2006,19(6):1-6.
- [56] CHEN Y M, CAO W P, CHEN R P. An Experimental Investigation of Soil Arching Within Basal Reinforce and Unreinforced Piled Embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26(2):164-174.
- [57] 陈云敏,贾宁,陈仁朋.桩承式路堤土拱效应分析[J].中国公路学报,2004,17(4):1-6.
- [58] CHEN R P, XU Z Z, CHEN Y M, et al. Field Tests on Pile-supported Embankments over Soft Ground[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(6):777-785.
- [59] 饶为国,赵成刚.桩-网复合地基应力比分析与计算[J].土木工程学报,2002,35(2):74-79.
- [60] 饶卫国,赵成刚.复合地基工后沉降的薄板变形模拟[J].应用力学学报,2002,19(2):133-136.
- [61] 陈仁朋,徐正中,陈云敏.桩承式加筋路堤关键问题研究[J].中国公路学报,2007,20(2):7-12.
- [62] 陈仁朋,许峰,陈云敏,等.软土地基上刚性桩-路堤共同作用分析[J].中国公路学报,2005,18(3):7-13.
- [63] 陈仁朋,凌道盛,陈云敏.群桩基础沉降计算中的几个问题[J].土木工程学报,2003,36(10):89-94.
- [64] ZHOU W H, CHEN R P, ZHAO L S, et al. A Semi-analytical Method for the Analysis of Pile-supported Embankments[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2012, 13(11):888-894.
- [65] 陈仁朋,贾宁,陈云敏.桩承式加筋路堤受力机理及沉降分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(23):4358-4367.
- [66] 陈仁朋,任宇,陈云敏.刚性单桩竖向循环加载模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(12):1926-1933.
- [67] CHEN R P, ZHOU W H, CHEN Y M. Influences of Soil Consolidation and Pile Load on the Development of Negative Skin Friction of a Pile[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(8):1265-1271.
- [68] CHEN R P, CHEN Y M, HAN J, et al. A Theoretical Solution for Pile-supported Embankments on Soft Soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(5):611-623.
- [69] 郑刚,刘力,韩杰.刚性桩加固软弱地基上路堤的稳定性问题(I)——存在问题及单桩条件下的分析[J].岩土工程学报,2010,32(11):1648-1657.
- [70] 郑刚,刘力,韩杰.刚性桩加固软弱地基上路堤稳定性问题(II)——群桩条件下的分析[J].岩土工程学报,2010,32(12):1811-1820.
- [71] LI N, CHEN B, CHEN F X. The Coupled Heat-moisture-mechanic Model of the Frozen Soils[J]. Cold Region Science and Technology, 2000, 31(3):199-205.
- [72] 李宁,徐彬,陈飞熊.冻土路基温度场、变形场和应力场的耦合分析[J].中国公路学报,2006,19(3):1-7.
- [73] 陈飞熊,李宁,程国栋.饱和正冻土多孔多相介质的理论构架[J].岩土工程学报,2002,24(2):213-217.
- [74] 何平,程国栋,俞祁浩,等.饱和正冻土中的水、热、力场耦合模型[J].冰川冻土,2000,22(2):135-138.
- [75] 李洪升,刘增利,梁承姬.冻土水热力耦合作用的数学模型及数值模拟[J].力学学报,2001,33(5):621-629.
- [76] 朱志武,宁建国,马巍.基于损伤的冻土本构模型及水、热、力三场耦合数值模拟研究[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40(6):758-772.
- [77] 毛雪松,杨锦凤,张正波,等.温度-湿度-荷载综合作用下路基冻融过程试验研究[J].冰川冻土,2012,34(2):427-434.
- [78] 李东庆,周家作,张坤,等.季节性冻土的水-热-力建模与数值分析[J].中国公路学报,2012,25(1):1-7.
- [79] 王铁行,胡长顺,王秉纲,等.考虑多种因素的冻土路基温度场有限元方法[J].中国公路学报,2000,13(4):10-13.
- [80] 毛雪松,胡长顺,侯仲杰.冻土路基温度场室内足尺模型试验[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(1):30-33.
- [81] 汪双杰,陈建兵,章金钊.保温护道对冻土路基地温特征的影响[J].中国公路学报,2006,19(1):12-16,22.
- [82] 刘志强,赖远明,张明义,等.冻土路基的随机温度场[J].中国科学 D 辑:地球科学,2006,36(6):587-592.
- [83] 苗天德,郭力,牛永红,等.正冻土中水热迁移问题的混合物理论模型[J].中国科学:D 辑,1999,29(增1):8-14.

- [84] 郭力,苗天德,张慧,等.饱和正冻土中水热迁移的热力学模型[J].岩土工程学报,1998,20(5):87-91.
- [85] 汪海年,窦明健.青藏高原多年冻土区路基温度场数值模拟[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(4):11-15.
- [86] 李永强,韩龙武,崔珑,等.热棒在青藏高原风火山地区的实测效果分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2669-2672.
- [87] 潘卫东,连逢愈,邓宏艳,等.寒区工程中热棒技术的应用原理和前景[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增2):2673-2676.
- [88] 汪双杰,陈建兵,黄晓明.热棒路基降温效应的数值模拟[J].交通运输工程学报,2005,5(3):41-46.
- [89] 慕万奎,贺柏群,董德惠.热棒技术在伊春岛状冻土路基上的应用[J].黑龙江交通科技,2006(11):7-8.
- [90] 刘戈,章金钊,符进.利用热棒技术处治高温多年冻土路基病害[J].路基工程,2007(3):153-154.
- [91] 孙文,吴亚平,郭春香,等.热棒对多年冻土路基稳定性的影响[J].中国公路学报,2009,22(5):15-20.
- [92] 樊云龙.多年冻土地区热棒路基温度场研究[D].西安:长安大学,2011.
- [93] 刘永智,吴青柏,张建明,等.青藏高原多年冻土地区公路路基变形[J].冰川冻土,2002,24(1):10-15.
- [94] 胡长顺,何子文,窦明健,等.青藏公路纵向裂缝成因及处治对策研究总报告[R].西安:长安大学,2003.
- [95] 裴建中.多年冻土地区路基纵向裂缝形成机理及处治对策研究[D].西安:长安大学,2004.
- [96] 窦明健,裴建中,张伟,等.青藏公路多年冻土段纵向裂缝的分布规律及形成机理分析[J].公路,2007(11):73-77.
- [97] 房建宏,徐安花.《多年冻土地区公路病害和机理研究》成果综述[J].青海科技,2006,13(5):18-20.
- [98] 温智,盛煜,马巍,等.国道214线多年冻土地区公路路基典型纵向裂缝监测和模拟研究[C]//黄润秋,许强.第三届全国岩土与工程学术大会.成都:四川科学技术出版社,2009:50-53.
- [99] 徐安花.多年冻土地区公路路基纵向裂缝与路基走向关系的探讨[J].冰川冻土,2010,32(1):121-125.
- [100] 毛雪松,侯仲杰,王威娜,等.青藏公路湿地路段纵向裂缝形成机制及数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2010,29(9):1915-1921.
- [101] 王晓,程刚,黄卫.环氧沥青混凝土性能研究[J].东南大学学报:自然科学版,2001,31(6):21-24.
- [102] 张锐,黄晓明.添加 Sasobit 的沥青与沥青混合料性能分析[J].交通运输工程学报,2007,7(4):54-57.
- [103] 沈金安.特立尼达湖沥青及其应用前景[J].国外公路,2000,20(2):28-31.
- [104] 樊亮,申全军,张燕燕.天然岩沥青改性对沥青路面性能的影响[J].建筑材料学报,2007,10(6):740-744.
- [105] 马峰,傅珍.硬质沥青和高模量沥青混凝土在法国的应用[J].中外公路,2008,28(6):221-223.
- [106] 韩宏伟,黄绍龙,丁庆军,等.运用高粘度改性沥青配制 OGFC 的研究[J].武汉理工大学学报,2005,27(3):41-43.
- [107] 陈骁,金雷,吴至奇.SBS 改性沥青应力吸收层性能研究[J].中外公路,2005,25(3):99-101.
- [108] 徐剑,秦永春,黄颂昌.微表处混合料路用性能研究[J].公路交通科技,2002,19(4):39-42.
- [109] 郝培文,申艳梅.SBS 与沥青相容性的研究[J].西安公路交通大学学报,2001,21(2):27-29.
- [110] 熊萍,郝培文.改善 SBS 改性沥青储存稳定性的措施与机理分析[J].同济大学学报:自然科学版,2006,34(5):613-618.
- [111] 刘大梁,包双雁.有机化蒙脱土改善 SBS 改性沥青性能的研究[J].建筑材料学报,2007,10(4):500-504.
- [112] 肖鹏,李雪峰.纳米 ZnO/SBS 改性沥青微观结构与共混机理[J].江苏大学学报:自然科学版,2006,27(6):548-551.
- [113] WEN G, ZHANG Y, ZHANG Y, et al. Rheological Characterization of Storage-stable SBS-modified Asphalts[J]. Polymer Testing, 2002, 21(3): 295-302.
- [114] 李志刚,邓小勇,沈江霞.杜仲胶与 SBS 改性沥青共混试验研究[J].公路,2008(8):217-220.
- [115] 黄卫东,孙立军.SBS 改性沥青的混合原理与过程[J].同济大学学报:自然科学版,2002,30(2):189-192.
- [116] 孙大权,吕伟民.SBS 改性沥青热储存稳定性研究[J].建筑材料学报,2006,9(6):671-674.
- [117] 康爱红,陈娟,孙立军.SBS 改性沥青性能及显微形态结构分析[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2012,13(6):702-706.
- [118] 康爱红,寇长江,张吴红.SBS 改性沥青荧光显微图像的采集与处理[J].江苏大学学报:自然科学版,2012,33(6):710-714.
- [119] 陈颖娣,范春华,涂娟,等.化学助剂对 SBS 改性沥青的性能影响初探[J].石油沥青,2012,26(1):24-28.
- [120] 康爱红,张吴红,孙立军.基于显微形态观测的 SBS 改性沥青储存后性能评价[J].中国矿业大学学报,2012,41(6):988-992.
- [121] 赵永利,顾凡,黄晓明.基于 FTIR 的 SBS 改性沥青老化特性分析[J].建筑材料学报,2011,14(5):620-

- 623.
- [122] 丛玉凤,廖克俭,翟玉春. 分子模拟在 SBS 改性沥青中的应用[J]. 化工学报, 2005, 56(5): 769-773.
- [123] ALLISON K. Those Amazing Rubber Roads[J]. Rubber World, 1967, 78(3/4): 47-52.
- [124] MCDONALD C H. Recollections of Early Asphalt-Rubber History[C]//FHWA. National Seminar on Asphalt-Rubber. San Antonio: Asphalt Rubber Producers Group, 1981: 23-29.
- [125] JONES D, HARVEY J, MONISMITH C. Reflective Cracking Study: Summary Report [R]. Davis & Berkeley: University of California Pavement Research Center, 2007.
- [126] QI X, SHENOY A, AL-KHATEEB G, et al. Laboratory Characterization and Full-scale Accelerated Performance Testing of Crumb Rubber Asphalts and Other Modified Asphalt Systems[C]//JORGE B S. Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference. Palm Springs: JORGE B S, 2006: 39-65.
- [127] 汪双杰, 台电仓. 改性沥青结合料低温性能评价指标[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(3): 25-30.
- [128] 韦大川, 王云鹏, 李世武, 等. 橡胶粉与 SBS 复合改性沥青路用性能与微观结构[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(3): 525-529.
- [129] 李 振. 温拌再生沥青混合料性能评价研究[D]. 北京: 北京建筑工程学院, 2011.
- [130] 黄 明. 温拌再生沥青混合料关键技术研究及性能评价[J]. 公路, 2012(10): 162-166.
- [131] 乔英娟. 温拌再生沥青混合料关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2011, 4(4): 183-186.
- [132] 孙吉书, 肖 田, 杨春风, 等. 温拌再生沥青混合料的路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(2): 250-253.
- [133] WALTERS R B. Flame Retarded Asphalt Blend Composition: USA, 04659381[P]. 1987-04-21.
- [134] JOLITZ R J, KIRK D R. Flame Retardant Asphalt Composition: USA, 04804696[P]. 1989-02-14.
- [135] 袁小亚, 范芳芳. 阻燃沥青的研究进展[J]. 中外公路, 2012, 32(1): 240-243.
- [136] 徐 婷. 隧道阻燃抑烟沥青及其混合料技术性能与机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [137] NB/SH/T0815—2010, 沥青燃烧性能测定——氧指数法[S].
- [138] 徐亦航. 排水性沥青路面技术性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [139] 姜 院. 沥青胶浆自愈合能力研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [140] 孙大权, 张立文. 沥青混凝土疲劳损伤自愈合行为研究进展(1)——自愈合行为机理与表征方法[J]. 石油沥青, 2011, 25(5): 7-11.
- [141] 孙大权, 张立文. 沥青混凝土疲劳损伤自愈合行为研究进展(2)——自愈合能力增强技术[J]. 石油沥青, 2011, 25(6): 8-11.
- [142] 曹林辉, 孙大权. 沥青混凝土疲劳损伤自愈合行为研究进展(3)——自愈合理论与行为方程[J]. 石油沥青, 2011, 26(4): 1-5.
- [143] 吴少鹏, 磨炼同, 水中和, 等. 导电沥青混凝土的制备研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2002, 26(5): 6-9.
- [144] 刘小明. 导电沥青混凝土的机敏特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [145] 谈至明, 周玉民, 刘少文, 等. 不等尺寸双层混凝土路面结构力学模型研究[J]. 工程力学, 2010, 27(3): 132-137, 162.
- [146] JTG D40—2011, 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
- [147] 中交路桥技术有限公司. 基于多指标的沥青路面结构设计方法研究[R]. 北京: 中交路桥技术有限公司, 2012.
- [148] 广西交通科学研究院. 水泥混凝土路面施工变异性及控制技术研究[R]. 南宁: 广西交通科学研究院, 2012.
- [149] 周玉民, 谈至明, 刘少文, 等. 水泥混凝土路面角隅应力分析[J]. 工程力学, 2010(4): 105-110.
- [150] 交通运输部公路科学研究院. 基于耐久性的水泥混凝土路面结构设计技术研究[R]. 北京: 交通部运输部公路科学研究院, 2012.
- [151] 廉向东, 付其林, 陈拴发. 基于板底脱空的水泥混凝土路面动水压力试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 100-103.
- [152] 谈至明, 谭福平. 水泥混凝土路面板底脱空区水运动规律的分析模型[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008, 23(3): 281-286.
- [153] 沙爱民, 胡力群. 路面基层材料抗冲刷性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3): 276-280.
- [154] 朱唐亮, 谈至明, 周玉民. 水泥稳定类基层材料抗冲刷性能的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(4): 565-569.
- [155] 谈至明, 姜 艺, 郭林泉, 等. 沥青加铺层温度应力研究(Ⅲ): 应力分析与局部处理[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 333-338.
- [156] JTG/T F20—2013, 公路水泥混凝土路面施工技术规范[S].
- [157] 薛彦卿, 黄晓明. 基于 NDT 技术的脱空判别改进方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(6): 1187-

- 1193.
- [158] 彭永恒, 马 荣. 声振法水泥混凝土路面地基脱空判定[J]. 黑龙江大学学报: 自然科学版, 2009, 26(2): 276-280.
- [159] 赵 军, 唐伯明, 谈至明, 等. 基于弯沉指数的水泥混凝土路面角脱空识别[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2006, 34(3): 335-339.
- [160] 英 红, 谈至明. 基于双目视觉的水泥混凝土路面错台检测方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 247-252.
- [161] 广西交通科学研究所. 水泥混凝土路面养护技术研究[R]. 南宁: 广西交通科学研究所, 2012.
- [162] 同济大学. 水泥混凝土路面工作状态评价及预养护技术研究[R]. 上海: 同济大学, 2012.
- [163] TRB. Guide for Mechanistic-empirical Design of New and Rehabilitated Structures [R]. Washington DC: TRB, 2004.
- [164] KIM S M, WON M C, MCCULLOUGH B F. Mechanistic Modeling of Continuously Reinforced Concrete Pavement[J]. ACI Structural Journal, 2003, 100(5): 674-682.
- [165] SELEZNEVA O, RAO C, DARTER M, et al. Development of a Mechanistic-empirical Structural Design Procedure for Continuously Reinforced Concrete Pavements [J]. Transportation Research Record, 2004, 1896: 46-56.
- [166] JOHNSTON D, SURDAHL R W. Effects of Design and Material Modifications on Early Cracking of Continuously Reinforced Concrete Pavements in South Dakota[J]. Transportation Research Record, 2008, 2081: 103-109.
- [167] GHARAIBEH N G, DARTER M I, HECKEL L B. Field Performance of CRCP in Illinois[J]. Transportation Research Record, 1999, 1684: 44-50.
- [168] WON M C. Continuously Reinforced Concrete Pavement: Identification of Distress Mechanisms and Improvement of Mechanistic-empirical Design Procedures [J]. Transportation Research Record, 2011, 2226: 51-59.
- [169] SPINKEL M. Evaluation of the Construction and Initial Condition of Bonded and Unbonded Hydraulic Cement Concrete Overlays Placed on a Continuously Reinforced Concrete Pavement on U. S. 58[R]. Charlottesville, Virginia Center for Transportation Innovation and Research, 2012.
- [170] MILNE T I, MUKANDILA M W, HORAK E. Constructibility Aspects of Ultra Thin Continuously Reinforced Concrete Pavement: A Full Scale Research Project (from Construction to End of Maintenance Period) [C]//ARRB Group Limited. Proceedings of the 24th ARRB Conference. Melbourne: ARRB Group Limited, 2010: 1-19.
- [171] 王 虎, 胡长顺, 王秉纲. 连续配筋混凝土路面荷载应力精确解[J]. 中国公路学报, 2000, 13(2): 1-4.
- [172] 黄晓明, 白 桃, 金 晶, 等. 连续配筋水泥混凝土路面的温度翘曲应力研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(7): 1026-1030.
- [173] 王衍辉, 张洪亮, 徐士翠. 连续配筋混凝土路面裂缝间距的主动控制[J]. 公路交通科技, 2012, 29(9): 24-29.
- [174] 曹东伟, 胡长顺. 连续配筋混凝土路面裂缝间距的可靠性分析[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(3): 37-41.
- [175] 左志武, 张洪亮, 陈 江. 连续配筋混凝土路面性能参数影响的试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(1): 23-29.
- [176] 李 盛, 刘朝晖, 李宇峙. CRC+AC 复合式路面结构层厚度对温度效应及车辙变形的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 21-28.
- [177] 王 斌, 黄 卫, 杨 军, 等. 连续配筋混凝土路面路用性能预测与评价方法[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 24-30.
- [178] ZHANG H, WANG Y. Measurement and Analysis of Early-age Strain and Stress in Continuously Reinforced Concrete Pavement[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2011, 4(2): 89-96.
- [179] 王衍辉. 连续配筋混凝土路面横向裂缝分布预估研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [180] 宋 柳. 车辆荷载、温度梯度和湿度梯度综合作用下 CRCP 结构应力分析[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [181] 陈 江. 连续配筋混凝土配合比设计方法及施工技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [182] 贾建峰. 连续配筋混凝土路面面层与基层间沥青混合料功能层研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [183] 毛雪松, 马 翥. 基于水热耦合效应的冻土路基稳定型研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [184] 马 翥, 王秉纲. 冻土地区路面基层结构与材料[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [185] 毛雪松. 多年冻土地区路基水热力场耦合效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2004.
- [186] 樊 凯. 多年冻土地区特殊路基设计与施工技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- [187] 朱东鹏. 青藏公路多年冻土区路基病害预警系统研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.

- [188] 司伟. 多年冻土地区沥青路面结构适应性与耐久性研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [189] 李海光. 新型支挡结构设计工程实例[M]. 2版. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [190] 刘国楠, 胡荣华, 潘效鸿, 等. 衡重式桩板挡墙受力特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(1): 103-110.
- [191] 彭述权, 刘爱华, 樊玲. 不同位移模式刚性挡墙主动土压力研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(1): 32-35.
- [192] SUBBA R K S, DEEPANKAR C S M. Seismic Passive Earth Pressures in Soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(1): 131-135.
- [193] 陈昌富, 唐仁华, 梁冠亭. 基于混合粒子群算法和能量法主动土压力计算[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1845-1850.
- [194] 陈昌富, 肖重阳, 唐仁华. 基于 PSO 搜索潜在滑裂面非极限状态土压力计算[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2013, 40(2): 9-14.
- [195] 顾慰慈. 挡土墙土压力计算手册[M]. 北京:中国建材工业出版社, 2005.
- [196] LIN Y L, LIU Y J, LI J J. Dynamic Response Law About Gravity Retaining Wall to Seismic Characteristics and Earth Fill Properties[J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19(3): 657-663.
- [197] 王丽艳, 刘汉龙. 回填砂土重力式挡土墙地震土压力研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 26-33.
- [198] 陈栋梁, 党进谦. 重力式挡土墙的截面优化设计研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1969-1973.
- [199] 邵龙潭, 刘士乙, 李红军. 基于有限元滑面应力法重力式挡土墙结构抗滑稳定分析[J]. 水利学报, 2011, 42(5): 602-608.
- [200] 肖尊群, 刘宝琛, 乔世范, 等. 重力式挡土墙结构模糊随机可靠性分析[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2010, 41(4): 1522-1527.
- [201] 杜永峰, 余钰, 李慧. 重力式挡土墙稳定性的结构体系可靠度分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 349-353.
- [202] 凌天清, 曾德荣. 公路支挡结构[M]. 北京:人民交通出版社, 2006.
- [203] 卢肇钧. 锚定板挡土结构[M]. 北京:中国铁道出版社, 1989.
- [204] TB 10025—2001, 铁路路基支挡结构设计规范[S].
- [205] 朱彦鹏, 王光彬, 董建华. 锚定板挡墙的有限元分析[J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(3): 116-119.
- [206] 杨育文. 土钉墙计算方法的适用性[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3357-3364.
- [207] 朱剑峰, 陈昌富, 徐日庆. 土钉墙内部稳定性分析自适应禁忌变异遗传算法[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1663-1669.
- [208] 朱剑峰, 陈昌富, 徐日庆. 基坑土钉支护可靠性分析优化算法[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2336-2341.
- [209] 屠毓敏. 软弱基坑中土钉支护墙整体稳定性分析应注意的问题[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 591-594.
- [210] 周健, 郭建军, 崔积弘, 等. 土钉拉拔接触面的细观模型试验研究与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1936-1944.
- [211] 王步云. 土钉墙设计[J]. 岩土工程技术, 1997(4): 30-41.
- [212] 付文光, 杨志银, 刘俊岩, 等. 复合土钉墙的若干理论问题、兼论《复合土钉墙基坑支护技术规范》[J]. 岩土力学与工程学报, 2012, 31(11): 2291-2304.
- [213] 杨育文. 复合土钉墙实例分析和变形评估[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 734-741.
- [214] 付文光, 杨志银. 复合土钉墙整体稳定性验算公式研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 742-747.
- [215] 杨敏, 刘斌. 疏排桩-土钉墙组合支护结构工作原理[J]. 建筑工程学报, 2011, 32(2): 126-133.
- [216] 张丽丽, 张钦喜, 马庆迅. 桩锚-土钉组合支护中土钉受力规律[J]. 北京工业大学学报, 2011, 37(9): 1338-1342.
- [217] HOLLENBECK E, MARLOTH R, ES-SAID O S. Case Study—Seams in Anchor Studs[J]. Engineering Failure Analysis, 2003, 10(2): 209-213.
- [218] SERRANO A, OLALLA C. Tensile Resistance of Rock Anchors[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(4): 449-474.
- [219] ZHAO T B, MA Y H, TAN Y L, et al. Creep Characteristic Simulation of Deep Soft Rock Roadway and Long-term Mechanical Analysis of Lining Support[J]. Journal of Coal Science & Engineering, 2009, 15(2): 193-196.
- [220] 张永兴, 饶泉宇, 唐树名, 等. 预应力锚索注浆体与岩石黏结界面抗剪强度试验[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 1-6.
- [221] 程良奎. 岩土锚固的现状与发展[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7-12.
- [222] PHILLIPS S H E. Factors Affecting the Design of Anchorages in Rock[M]. London: Cementation Research Ltd, 1970.
- [223] 蒋忠信. 拉力型锚索锚固段剪应力分布的高斯曲线模式[J]. 岩土工程学报, 2001, 36(2): 696-699.
- [224] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数

- 模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 188-192.
- [225] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增1): 2847-2854.
- [226] 郑文博, 庄晓莹, 蔡永昌, 等. 地震作用下预应力锚索对岩石边坡稳定性影响的模拟方法及锚索优化研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(9): 1668-1676.
- [227] 石玉成, 秋仁东, 孙军杰, 等. 地震作用下预应力锚索加固危岩体的动力响应分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1157-1162.
- [228] 何思明, 王全才, 罗渝. 钢绞线锈蚀对预应力锚索荷载传递特性的影响[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2010, 42(1): 1-4.
- [229] 付丹, 郭红仙, 程晓辉, 等. 预应力锚索工作应力的检测方法——拉脱法的检测机制和试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(8): 2247-2252.
- [230] 罗江波. 壁板式锚杆挡土墙典型破坏原因分析及加固措施[J]. 工程勘察, 2011, 39(6): 19-22.
- [231] 丁常国, 贺淑焕. 深基坑开挖与板肋式锚杆挡墙逆作法施工技术[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 250-258.
- [232] 周勇, 朱彦鹏. 框架预应力锚杆柔性支护结构坡面水平位移影响因素[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 470-476.
- [233] 王平. 垂直预应用锚杆应用实例[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(2): 23-27.
- [234] GB 50330—2002, 建筑边坡工程技术规范[S].
- [235] 唐仁华, 陈昌富. 锚杆挡土墙可靠度分析与计算方法[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1389-1394.
- [236] 唐仁华, 陈昌富. 系统可靠性理论在肋柱锚杆体系中的应用[J]. 公路交通科技, 2011, 28(1): 37-41.
- [237] 唐仁华, 陈昌富. 基于统一强度理论的锚杆挡土墙可靠度分析[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 69-73.
- [238] 高江平, 俞茂宏, 胡长顺, 等. 加筋土挡土墙土压力及土压力系数分布规律研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 582-584.
- [239] 李海深, 杨果林, 邹银生. 加筋土挡土墙动力特性分析[J]. 中国公路学报, 2004, 17(2): 28-32.
- [240] 刘华北. 水平与竖向地震作用下土工格栅加筋挡土墙动力分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 594-599.
- [241] 杨广庆, 周敏娟, 张保健. 加筋土挡土墙水平位移研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(7): 1248-1252.
- [242] 王向余, 刘华北, 宋二祥. 黏性土填土蠕变对土工合成材料加筋土挡土墙响应的影响[J]. 中国公路学报, 2008, 21(2): 1-5.
- [243] 李广信, 陈平, 介玉新, 等. 加筋土挡土墙在二维超静孔压下的稳定分析[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 103-107.
- [244] 杨广庆. 台阶式加筋挡土墙设计方法的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 695-698.
- [245] WANG Cheng-zhi, LUAN Mao-tian, ZHU Ze-qi. Model Test and Numerical Analysis on Long-term Mechanical Properties of Stepped Reinforced Retaining Wall[J]. Transactions of Tianjin University, 2012, 18(1): 62-68.
- [246] 冯光乐, 许志鸿, 凌天清. 复杂断面加筋土挡墙的设计方法[J]. 公路交通科技, 2001, 18(6): 17-20.
- [247] 李示波, 高永涛, 黄志安. 喷网锚在加筋土挡土墙加固中的应用[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(6): 655-658.
- [248] 张志增, 高永涛, 马飞. 失稳加筋土挡土墙的联合加固技术[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(10): 917-920.
- [249] 吴顺川, 高永涛, 王金安. 失稳加筋土挡土墙加固方案及技术评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3086-3091.
- [250] STEWART D P, JEWELL R J, RANDOLPH M F. Design of Piled Bridge Abutments on Soft Clay for Loading from Lateral Soil Movements[J]. Geotechnique, 1994, 44(2): 277-296.
- [251] TSCHEBOTARIOFF G P. Foundations, Retaining and Earth Structures [M]. New York: McGraw-Hill, 1973.
- [252] MARCHE R, SCHNEEBERGER C E. Bending Moments Prediction in Piles Subjected to Horizontal Soil Movements [C]//ICSMFE. Proceedings of the 9th Conference. Tokyo: ICSMFE, 1997: 98-99.
- [253] CAI F, UGAI K. Numerical Analysis of the Stability of a Slope Reinforced with Piles[J]. Soils and Foundations, 2000, 40(1): 73-84.
- [254] CHEN L T, POULOS H G. Piles Subjected to Lateral Soil Movements[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(9): 802-811.
- [255] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
- [256] 戴自航, 彭振斌. 地基系数法在岩体抗滑桩内力计算中的应用[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2002, 29(1): 98-104.
- [257] 吴恒立. 计算推力桩的综合刚度原理和双参数法[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [258] 刘洪佳, 门玉明, 李寻昌, 等. 悬臂式抗滑桩模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2960-2966.
- [259] 欧孝夺, 唐迎春, 崔伟, 等. h型抗滑桩模型试验及

- 数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(9): 1936-1943.
- [260] 许江波, 郑颖人. 埋入式抗滑桩振动台模型试验分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1896-1902.
- [261] 钱同辉, 徐 华, 夏文才, 等. 框架式抗滑桩受力特性对比分析[J]. 中国公路学报, 2012, 25(6): 56-79.
- [262] 胡毅夫, 汪婷勇, 马 莉. 微型抗滑桩双排单桩与组合桩抗滑特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1499-1505.
- [263] 申永江, 孙红月, 尚岳金, 等. 滑坡推力在悬臂式双排抗滑桩上的分配[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增 1): 2668-2673.
- [264] 李寻昌, 门玉明, 张 涛, 等. 锚杆抗滑桩破坏模式的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 803-807.
- [265] 吴坤明, 王建国, 谭晓慧. 基于可靠度分析确定刚性抗滑桩锚固深度[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(2): 237-242.
- [266] FHWA. Flexibility in Highway Design[M]. Washington DC: FHWA, 1997.
- [267] AASHTO. Highway Safety Design and Operations Guide[M]. Washington DC: AASHTO, 1997.
- [268] THEEUWES J, GODTHELP H. Self-explaining Roads [J]. Safety Science, 1995, 19(2): 217-225.
- [269] NEUMAN T R, SCHWARTZ M, CLARK L, et al. A Guide to Best Practices for Achieving Context Sensitive Solutions[M]. Washington DC: TRB, 2002.
- [270] STAMATIADIS N, HARTMAN D. Context Sensitive Solutions vs Practical Solutions: What Are the Differences? [J]. Transportation Research Record, 2011, 2262: 173-180.
- [271] 程建川, 张健康, 陈景雅, 等. 简论道路综合敏感性设计理念[J]. 公路, 2007(7): 89-93.
- [272] 钱国超. 高速公路创新设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [273] 杨宏志, 李 超, 许金良. 基于多目标进化算法的公路路线优化模型[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2010, 34(3): 496-500.
- [274] 汪双杰, 郭腾峰, 刘建蓓, 等. 中国公路运行速度体系与工程应用技术研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(增): 1-7, 23.
- [275] 张泽良. 基于运行速度的双车道公路线形设计方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [276] 汪 洋. 基于运行速度的山区低等级公路线形设计方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- [277] 杨少伟, 王海君, 张 驰, 等. 可能速度与交通事故的关系[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 34-38.
- [278] 张景涛, 杨少伟, 潘兵宏. 基于可能速度的公路线形评价标准[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(2): 40-43.
- [279] 符铎砂. 理论运行速度与公路线形设计及评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [280] 朱兴琳. 基于可靠度理论的公路路线设计[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4): 46-50.
- [281] 陈富坚, 郭忠印, 陈富强, 等. 公路平曲线半径的可靠性设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(4): 100-104.
- [282] 游克思, 孙 璐, 顾文钧. 公路平曲线半径可靠性设计理论与方法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(6): 1-6.
- [283] 聂瑞红. 基于可靠度的道路平纵线形设计研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [284] 徐 进. 基于“行驶轨迹-行驶速度”协同控制的公路路线设计理论与方法[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [285] 庄传仪, 赵一飞, 潘兵宏, 等. 公路纵坡设计关键参数研究[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 39-44.
- [286] 潘兵宏, 杨少伟, 赵一飞. 山区高速公路长大下坡路段界定标准研究[J]. 中外公路, 2009, 29(6): 6-10.
- [287] 王 博. 山区高速公路平均纵坡的研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [288] HENAO J J P, ACEVEDO E Y S. Implementation of Transition Curves in Vertical Alignment of Roads [C]//HAWOOD D W, GARCIA A G. Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valencia: Polytechnic University of Valencia Press, 2010: 9-16.
- [289] MAUGA T. Roadside Clearance Limit on Horizontal Curves with Transition Arcs; Sites with Circular Arcs Shorter than Sight Distance [C]//TRB. Proceedings of the 92nd Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington DC: TRB, 2013: 1-19.
- [290] 张荣洁. 道路曲线间最短直线长度研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [291] 程国柱, 裴玉龙. 高速公路直线段最大长度合理取值研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(8): 142-145.
- [292] GIBBONS R B, FLINTSCH A M, WILLIAMS B, et al. Evaluation of the Impact of Modern Headlamp Technology on Sag Vertical Curve Design Criteria [C]//TRB. Proceedings of the 92nd Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington DC: TRB, 2013: 1-22.
- [293] AASHTO. A Policy on Geometric Design of Highways and Streets [M]. Washington DC: AASHTO,

- 2004.
- [294] 赵腊红. 旧路平面线形拟合法线偏差分布规律及拟合精度的控制[D]. 长沙:长沙理工大学, 2009.
- [295] 施金君,程建川. 利用 Matlab 对老路纵断面线形拟合[J]. 中外公路, 2010, 30(5): 4-6.
- [296] 廖若宇,陈雨人. 基于数字图像的道路平面线形恢复的研究[J]. 交通信息与安全, 2011, 29(2): 117-120, 129.
- [297] RASDORF W, FINDLEY D J, ZEGEER C V, et al. Evaluation of GIS Applications for Horizontal Curve Data Collection[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2011, 26(2): 191-203.
- [298] FINDLEY D J, HUMMER J E, RASDORF W, et al. Collecting Horizontal Curve Data: Mobile Asset Vehicles and Other Techniques[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2013, 19(1): 74-84.
- [299] 杨 轸,方守恩,高国武. 基于 GPS 的道路线形恢复技术的研究[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2003, 31(5): 567-571.
- [300] 廖小辉,黄 新,张效忠. 多目标非线性优化方法在公路选线中的应用[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2010, 34(1): 109-112.
- [301] 王 恒. 公路路线方案合理性研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
- [302] 杨献波,温善振,杨春晖,等. 岩溶地区高速公路总体设计探讨与实践[J]. 公路: 2012(5), 16-20.
- [303] KANG M W, JHA M K, SCHONFELD P. Applicability of Highway Alignment Optimization Models [J]. Transportation Research Part C, 2012, 21(1): 257-286.
- [304] YANG N, KANG M W, SCHONFELD P, et al. Multiple Objective Optimization of Highway Alignments Incorporating Preference Information[C]//TRB. Proceedings of the 89th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2010: 1-14.
- [305] LEE Y, TSOU Y R, LIU H L. Optimization Method for Highway Horizontal Alignment Design[J]. Journal of Transportation Engineering, 2009, 135(4): 217-224.
- [306] 郭 阳. 基于环境影响的山区公路选线研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [307] 赵厚诚. 道路设计对于行车碳排放之影响分析——以雪山隧道为例[D]. 台北:国立中央大学, 2011.
- [308] Trimble. Trimble Quantum Alignment Planning System[R]. Melbourne: Trimble Navigation Limited, 2009.
- [309] 马壮林,邵春福,胡大伟,等. 高速公路交通事故起数时空分析模型[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(2): 93-99.
- [310] 李苏旻,严 钧,许 宁. 公路景观三维实时漫游系统研究及实现[J]. 中外公路, 2010, 30(4): 18-21.
- [311] KUHN W, KUBIK R, LEITHOFF I. Comprehensive 3D Methodology for the Design, Assessment and Checking Process of Rural Roads[C]//TRB. Proceedings of the 92nd Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2013: 1-13.
- [312] KIM D G, LOVELL D J. A Procedure for 3-D Sight Distance Evaluation Using Thin Plate Splines[C]//TRB. Proceedings of the 90th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2011: 1-15.
- [313] 张 驰,杨少伟,赵一飞,等. 公路三维视距的检验方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2009, 29(3): 54-57.
- [314] 廖军洪,邵春福,邬洪波,等. 公路三维动态视距计算方法及评价技术[J/OL]. 吉林大学学报:工学版, 2012, 42. [2013-03-22]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.2012622.1020.018.html>.
- [315] 王春娥. 高速公路立交变速车道长度研究[J]. 公路交通科技, 2012, 30(1): 120-125.
- [316] 丁华磊. 互通式立交集散车道设置条件研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
- [317] 杨少伟,王 晓,冯玉荣,等. 基于交通冲突技术互通式立交最小净距研究[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2011, 33(3): 133-137.
- [318] FITZPATRICK K, PORTER R J, PESTI G, et al. Guidelines for Spacing Between Freeway Ramps[J]. Transportation Research Record, 2011, 2262: 3-12.
- [319] 崔丽元. 山区高速公路互通立交主要技术指标研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2010.
- [320] 雷晓晖. 山区高速公路互通式立交最小间距的探讨和研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2011.
- [321] 杜立平. 群布型立交关键技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009.
- [322] 贾海燕. 展线型立交关键技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2009.
- [323] 高鲁宾. 山区约束型立交关键技术研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2010.
- [324] BERRY C, CLICK S M. New Interchange Design: FRE Interchange Releasing Control and Enhancing Performance[C]//TRB. Proceedings of the 89th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2010: 1-17.

- [325] MOON J P, HUMMER J E, VAN DUYN M K. Introduction of the New Nano Interchange Design as a Directional Freeway-to-freeway Interchange [C]//HAWOOD D W, GARCIA A G. Proceedings of the 4th International Symposium on Highway Geometric Design. Valencia: Polytechnic University of Valencia Press, 2010: 1-14.
- [326] 张 谦, 王京元. 一种无交织的环形立交的概念设计[J]. 公路交通科技, 2012, 29(6): 122-126, 143.
- [327] 高 敏, 刘志强. 现代环形交叉口安全性分析和安全设计[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(4): 92-96.
- [328] HUMMER J E, BLUE V J, CATE J, et al. Taking Advantage of the Flexibility Offered by Unconventional Arterial Designs[J]. ITE Journal, 2012, 82(9): 38-43.
- [329] HOCHSTEIN J L, MAZE T, WELCH T, et al. J-Turn Intersection: Design Guidance & Safety Experience [C]//TRB. Proceedings of the 88th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2009: 1-15.
- [330] HUGHES W, JAGANNATHAN R, SENGUPTA D, et al. Alternative Intersections/Interchanges: Informational Report (AIR) [R]. Washington DC: Federal Highway Administration, 2010.
- [331] 陈 军, 杨少伟. 双层平面交叉口中的信息转换时机研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2011, 43(3): 400-403.
- [332] 孙 剑, 李克平, 徐洪峰. 城市道路平面交叉口设计过程质量控制研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(4): 114-117, 123.
- [333] SPACEK P. Track Behavior in Curve Areas: Attempt at Typology[J]. Journal of Transportation Engineering, 2005, 131(9): 669-676.
- [334] 任园园. 公路弯道路段行车危险区域及驾驶行为模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [335] 林 雨, 杨 轸, 潘晓东. 缓和曲线长度对车辆行驶轨迹的影响[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(2): 200-204.
- [336] 徐 进, 罗 庆, 彭其渊, 等. 回旋线设置对弯道行驶速度的影响分析[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 25-33.
- [337] 彭其渊, 徐 进, 罗 庆, 等. 公路平曲线参数对车辆轨迹和速度的影响规律[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 45-50.
- [338] 郭 健. 基于粒子群优化算法的驾驶员预期轨迹决策模型的改进[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [339] 管 欣, 张立存, 高振海. 驾驶员确定汽车预期轨迹的网格式优化模型[J]. 中国机械工程, 2006, 17(15): 1461-1464.
- [340] PROKOP G. Modeling Human Vehicle Driving by Model Predictive Online Optimization [J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 35(1): 19-53.
- [341] 徐 进, 罗 庆, 毛嘉川, 等. 考虑弯道几何要素和交通量影响的汽车行驶速度预测模型[J]. 中国公路学报, 2012, 25(5): 47-57.
- [342] MEMON R A, KHASKHELI G B, QURESHI A S. Operating Speed Models for Two-lane Rural Roads in Pakistan [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(5): 443-453.
- [343] VOIGT A P, KRAMMES R A. An Operational and Safety Evaluation of Alternative Horizontal Curve Design Approaches on Rural Two-lane Highways [J]. Transportation Research Circular, 1998, 11(1): 1-8.
- [344] 钟小明, 元海英, 荣 建, 等. 用于路线设计的小客车速度模型研究[J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(2): 155-160.
- [345] CRISMAN B, MARCHIONNA A, PERCO P, et al. Operating Speed Prediction Model for Two-lane Rural Roads [C]//TRB. Proceedings of the 3rd International Symposium on Highway Geometric Design. Washington DC: TRB, 2005: 1-22.
- [346] DELL A G, ESPOSITO T, LAMBERTI R, et al. Operating Speed Model on Tangents of Two-lane Rural Highways [C]//SIIV Congress. Proceedings of the 4th International SIIV Congress. Palermo: SIIV Congress, 2007: 1-15.
- [347] 贺玉龙, 卢仲贤, 马国雄. 高速公路直线段车辆稳定运行速度模型[J]. 公路, 2002(10): 99-103.
- [348] JTG/T B05—2004, 公路项目安全性评价指南[S].
- [349] BUCCHI A, BIASUZZI K, Simone A. Evaluation of Design Consistency: A New Operating Speed Model for Rural Roads on Grades. SIIV Congress. Proceedings of the 2nd International SIIV Congress. Firenze: SIIV Congress, 2004: 1-10.
- [350] GIBREEL G M, EASA S M, EL-DIMEERY I A. Prediction of Operating Speed on Three-dimensional Highway Alignments [J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(1): 21-30.
- [351] 许金良, 叶亚丽, 苏 英, 等. 双车道二级公路纵坡段车辆运行速度预测模型[J]. 中国公路学报, 2008, 21(6): 31-36.
- [352] 邓云潮. 公路长大下坡路段小客车运行速度预测模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(4): 43-47.
- [353] 荣 建. 高速公路基本路段通行能力研究[D]. 北京:

- 北京工业大学,1999.
- [354] 符铎,高捷.高速公路纵坡路段货车运行车速预测[J].公路交通科技,2008,25(6):139-143.
- [355] 杨志清,郭忠印,杜晓丽.基于视觉信息的高速公路运行车速预测模型[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(7):929-934.
- [356] HIMES S C, DONNELL E T. Speed Prediction Models for Multilane Highways: Simultaneous Equations Approach[J]. Journal of Transportation Engineering, 2010, 136(10): 855-862.
- [357] GARCIA A, LLOPIS-CASTELLO D, PEREZ-ZUR-IAGA A M, et al. Homogeneous Road Segment Identification Based on Inertial Operating Speed [C]// TRB. Proceedings of the 92nd Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2013: 1-22.
- [358] FHWA. Interactive Highway Safety Design Model (IHSDM): Design Consistency Module (DCM) Engineer's Manual [M]. Washington DC: FHWA, 2003.
- [359] 徐进,彭其渊,邵毅明.路线及路面条件设计阶段的安全性评价仿真系统[J].中国公路学报,2007,20(6):36-42.
- [360] 邵毅明,胡燕,于志刚,等.道路事故多发路段动力学仿真识别系统[J].西南交通大学学报,2008,43(2):30-33.
- [361] 杨宏志,许金良,李建士.基于计算机仿真的公路线形设计评价[J].中国公路学报,2005,18(1):14-18.
- [362] FITZPATRICK K, WOOLDRIDGE M D, TSIMHONI O, et al. Alternative Design Consistency Rating Methods for Two-lane Rural Highways [R]. Washington DC: FHWA, 2000.
- [363] 王书灵,陈金川,刘小明,等.基于驾驶员心理反应的安全坡度研究[J].公路交通科技,2007,24(2):126-129.
- [364] 潘晓东,杜志刚,蒋宏,等.驾驶员心率和血压变动与山区公路线形关系的实验研究[J].人类工效学,2006,12(2):16-18,30.
- [365] 徐进.用于道路几何线形质量评价的仿真模型和动力学指标[J].公路交通科技,2007,24(11):114-119.
- [366] 徐进,邵毅明,彭其渊.公路线形的操纵负荷分析及设计控制[J].东南大学学报:自然科学版,2009,31(4):867-872.
- [367] 徐进,彭其渊,邵毅明,等.山岭区低等级低指标公路路线的使用质量分析[J].同济大学学报:自然科学版,2010,38(2):245-251.
- [368] 孟祥海,关志强,郑来.基于几何线形指标的山区高速公路安全性评价[J].中国公路学报,2011,24(2):103-108.
- [369] FINDLEY D J, HUMMER J E, RASDORF W, et al. Modeling the Impact of Spatial Relationships on Horizontal Curve Safety[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012, 45: 296-304.
- [370] FU R, GUO Y, YUAN W, et al. The Correlation Between Gradients of Descending Roads and Accident Rates[J]. Safety Science, 2011, 49(3): 416-423.
- [371] 郭应时,付锐,袁伟,等.山区公路事故率与平面线形的关系[J].交通运输工程学报,2012,12(1):63-71.
- [372] 游克思,孙璐,顾文钧.山区公路路侧安全定量化评价[J].交通运输工程与信息学报,2010,8(3):49-55.
- [373] SHUMAKER M L, HUMMER J E, HUNTSINGER L F. Barriers to Implementation of Unconventional Intersection Designs: A Survey of Transportation Professionals[J/OL]. Public Works Management & Policy. [2013-03-29]. <http://pwm.sagepub.com/content/early/2012/07/19/1087724x12453927.abstract>.
- [374] MEESIT R, KANITPONG K, JIWATTANAKUL-PAISARN P. Investigating the Influence of Highway Median Design on Driver Stress[C]//TRB. Proceedings of the 92nd Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2013: 1-21.
- [375] 赵一飞,潘兵宏,王浩,等.高速公路中间带安全侧向净距值[J].长安大学学报:自然科学版,2008,28(1):46-50.
- [376] CALIENDO C, GUIDA M, PARISI A. A Crash-prediction Model for Multilane Roads[J]. Accident Analysis & Prevention, 2007, 39(4): 657-670.
- [377] 钟连德,孙小端,陈永胜,等.高速公路事故预测模型[J].北京工业大学学报,2009,35(7):966-971.
- [378] CHEN H, LIU P, BEHZADI B, et al. Impacts of Exit Ramp Type on the Safety Performance of Freeway Diverge Areas[C]//TRB. Proceedings of the 87th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington DC: TRB, 2008: 1-16.