

文章编号: 1002-0268 (2008) 12-0059-06

CRC+ AC 刚柔复合式路面结构与工程应用

刘朝晖, 郑健龙, 华正良

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 复合式路面是指面层由两层不同材料类型和力学性质的结构层复合而成的路面, 近年来在我国也有较多应用, 而 CRC+ AC 刚柔复合式路面的应用较少。论述了 CRC+ AC 复合式路面的结构组成、结构形式、结构力学特点与优点、层间界面结合技术以及近年来的工程应用等, 阐明了 CRC+ AC 的结构受力特性、端部变形特性、层间结构与材料以及其适用条件。研究表明: CRC+ AC 复合式路面具有良好的整体结构承载能力和使用性能, 是一种可充分利用当地资源和材料、结构强度高、使用寿命长、经济性和耐久性好的资源节约和环境友好型的路面结构, 是我国重载交通干线高速公路长寿命路面结构的型式之一, 并在我国的道路工程中多次应用。

关键词: 道路工程; 复合式路面; CRC; 层间界面结合; 工程应用

中图分类号: U416.224

文献标识码: A

Rigid-flexible Composite Asphalt Pavement of CRC+ AC Structure and Its Engineering Application

LIU Zhao-hui¹, ZHENG Jian-long², HUA Zheng-liang³

(School of Communication and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410076, China)

Abstract: Composite pavement is such a pavement combined by two structure layers of different materials and different mechanical properties, which is applied in China in recent years while the application of rigid-flexible composite pavement of CRC + AC is less. Structure composition, structure forms, structure mechanical characteristics and advantages, interlaminar interface bonding technology and engineering application of composite pavement of CRC + AC were discussed. The structure load characteristics, end deformation characteristics, interlaminar structure and material and its application conditions of CRC + AC were illustrated. The research result shows that composite pavement of CRC + AC possesses good integral structural bearing capacity and service performance. It is a rigid-flexible pavement structure of economic and environment-friendly resource with the characteristics of high structural intensity, long service life, economy and durability, which could be used adequately as a local resource and material. It is one type of the long-lived pavement structure for heavy load traffic expressway, which is applied repeatedly in road engineering in China.

Key words: road engineering; composite pavement; CRC; interlaminar interface bonding; engineering application

0 引言

近年来, 我国早期修建的干线高速公路, 路面均

出现了不同程度的早期破坏现象或远未达到设计使用年限而重建的情况, 给国家造成了极大的经济损失和资源浪费, 并引起了全社会的广泛关注。2006 年 5

收稿日期: 2007-10-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50778025); 湖南省教育厅资助科研项目 (05C236); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (20050536001)

作者简介: 刘朝晖 (1968-), 男, 湖南隆回人, 教授, 研究方向为道路工程。(zh2309471@yahoo.com.cn)

月30日的《人民日报》^[1]就对南方某省境内一段约300 km的主干线高速公路水泥混凝土路面一直维修不断、“补丁”数以千计的情况,进行了“高速公路修修补补何时了”的报导,社会影响极大。一条通车5 a的高速公路,怎就如此破损不堪?主要原因是重载交通的迅速增长、恶劣的气候环境以及设计施工管理中存在的不足,其中远超过设计轴载的重荷载是关键因素,因此,重载交通条件下路面结构的耐久性是广大科技工作者共同关注的焦点。

为了使路面结构具有足够的强度(承载能力)、稳定性(耐久性)和良好的使用性能,以便在行车荷载和自然因素共同作用下保证公路运输快速、安全、舒适,同时考虑到路面结构在技术上的先进性、经济上的合理性和环境资源上的可持续发展要求,当前世界各国都在不断探索新的路面结构和材料,近年来愈来愈为人们所重视的刚柔复合式路面就是一个典型的例子^[2]。

复合式路面是指面层由两层不同材料类型和力学性质的结构层复合而成的路面^[3~5]。一般采用水泥混凝土(CC)与沥青混凝土(AC)进行复合^[6~9],常用的结构是普通水泥混凝土(PCC)、碾压混凝土(RCC)或贫混凝土与沥青面层的复合^[2],如RCC+AC或旧水泥混凝土路面上加铺沥青面层。而将连续配筋混凝土(CRC)的高强度与沥青面层的行车舒适性结合的复合式路面^[10],整体强度更高、使用寿命更长、维修费用更小,是今后重载交通高速公路长寿命沥青路面发展方向之一。

本文对CRC+AC刚柔复合式路面的结构形式、结构特点、层间界面结合技术以及工程应用等方面进行论述,阐明其结构受力特性、端部变形特性、层间结构与材料特性以及其适用条件,并介绍近年来在我国的应用情况,供同行参考。

1 CRC+AC刚柔复合式路面结构形式

连续配筋混凝土刚柔复合式路面(CRC+AC)是将CRC良好的整体强度与AC良好的行车舒适性相结合的复合式路面,CRC由于没有接缝,由混凝土路面接缝引起的唧泥、错台、断板等病害得到了有效的控制;而且大量配置的纵横向钢筋的强化作用限制了裂缝的宽度和发展,减少了加铺沥青面层的反射裂缝发生的可能性;同时为AC面层提供强大的荷载承重层。而其上的AC层能缓冲汽车荷载对CRC板的冲击,降低CRC板的温度应力,减少了CRC板产生裂缝、边缘冲裂等病害,且为车辆提供平坦、舒适的行

驶表面,并有利于噪音的降低。因此CRC+AC是一种较理想的刚柔相济的复合式路面结构形式。

1.1 CRC+AC刚柔复合式路面结构组成

CRC+AC刚柔复合式路面结构,一般由地基基础、CRC板、层间界面粘结层、AC面层等结构层所组成,CRC板为承重结构层,AC面层为表面功能层,层间界面需要粘结层将刚性层与柔性层结合共同受力与变形,同时还需要稳定的地基作为基础共同承载。

复合式路面沥青面层的厚度,根据《公路水泥混凝土路面设计规范》^[3](JTG D40-2002)的有关要求,以连续配筋混凝土和横缝设传力杆的普通混凝土为基础的复合式路面中,沥青面层的厚度一般为2.5~8 cm;JTG D50-2006中[条文说明]:刚性基层沥青路面,高速公路的沥青面层最小厚度不宜小于10 cm^[5]。JTG D40-2002中旧水泥混凝土路面上沥青加铺层按减缓反射裂缝的要求,高速公路沥青面层的厚度宜为10 cm。

应用SHELL牌公司的BISAR软件对复合式路面层间剪应力进行分析,通过大量的计算,求得最大层间剪应力随着AC层厚度增加而减小,而AC层超过一定厚度(如12 cm)后,层间剪应力缓解效果不再明显。因此,AC层厚度为6~12 cm比较经济合适。

有研究表明^[11],AC层厚度增加,CRC板的荷载应力有所降低,但幅度不大。4 cm AC的作用相当于1 cm混凝土板的作用;而CRC的温度应力随AC层厚度的增加有较大的下降,AC层厚度从4 cm增加到12 cm,CRC荷载应力下降8%左右,而温度应力下降52%左右。AC层厚度小于4 cm时,CRC+AC的总应力与普通CRCP的应力比较接近或稍大,主要是由于AC层较薄,隔热效果不明显,对荷载的扩散能力有限,同时由于AC层有较大的太阳辐射吸收率,可使CRC板的温度梯度增大。综合考虑CRC+AC的结构应力与层间界面剪应力的理论计算与分析结果,沥青面层的厚度宜为6~12 cm,一般宜为8~10 cm。

CRC的板厚在理论上可较普通混凝土板略小,JTG D40-2002规范采用普通混凝土结构分析方法计算CRC板的应力,以有沥青上面层的混凝土板应力分析进行结构计算,考虑沥青面层对CRC板结构应力的影响,并确定CRC结构层的厚度。

1.2 CRC+AC刚柔复合式路面结构

CRC+AC刚柔复合式路面结构,根据应用的条件不同,一般有新建CRC+AC刚柔复合式路面结构,旧沥青路面或旧水泥混凝土路面上加铺CRC+AC复合式路面结构,旧连续配筋混凝土路面(CRCP)上

加铺沥青面层的复合式路面结构。国内目前应用的 CRC+ AC 结构, 具体见工程应用部分中的结构形式。

2 CRC+ AC 刚柔复合式路面结构特点

CRC+ AC 刚柔复合式路面结构, 由 CRC 板承受交通荷载, 作为主要承重结构; 由 AC 面层将直接承受的车辆荷载传给 CRC 板, 作为表面功能层, 因此具有如下的结构特点。

2.1 CRC+ AC 复合式路面结构的力学特点

CRC+ AC 刚柔复合式路面结构是在弹性半空间地基上, 连续配筋混凝土弹性薄板上覆沥青混合料弹性层的复杂结构, 承受交通荷载和环境温度变化多种因素的作用; 连续配筋混凝土的刚度与其上的沥青混凝土层模量相差很多, 收缩变形的累计差异效应也比普通混凝土路面大得多。

由于连续配筋混凝土板中配置了连续的纵向钢筋和一定的横向约束钢筋, 一般不设置胀缝和缩缝, 混凝土收缩所产生的横向裂缝, 由于钢筋的作用受到限制而不会发展过大, 因此加铺沥青面层产生反射裂缝的可能性大大降低, 反射裂缝不再是其主要的损害形式。

由于沥青混凝土面层摊铺在连续配筋混凝土层上, 层间主要靠沥青结合料的粘结力、沥青的内聚力以及沥青混合料与水泥混凝土表层的摩擦力来抵抗层间界面水平剪力, 而不像沥青混凝土层内部一样, 大量存在集料的嵌挤作用, 抗剪能力相对较弱。在汽车起动、急刹车等状态下, 水平推力较大, 路面容易产生车辙、滑移、拥包等现象。在拖车和挂车经常行驶的慢车道较陡峭上坡段, 由剪应力产生的破坏现象就更加明显, 尤其高温条件时在长期反复的荷载作用下, 沥青的劲度模量降低, 粘聚力减小, 抗剪强度会明显减少。因此对于连续配筋水泥混凝土与沥青混凝土复合式路面, 层间界面结合问题表现突出, 层间的抗剪必须予以高度重视。

2.2 CRC+ AC 刚柔复合式路面结构的端部变形特点

CRC+ AC 刚柔复合式路面结构端部会随着环境温度变化产生滑动位移, 一般变形量在 2~ 3 cm, 需对端部进行特殊处理, 而常规的 CRCP 端部处理方式对这种复合式路面不适用, 目前一般采用桥梁结构中的伸缩缝形式, 如普遍使用的毛勒缝。

2.3 CRC+ AC 刚柔复合式路面结构的优点

CRC+ AC 结构具有复合式路面的各项优点, 且由于 CRC 中配置纵向钢筋, 约束了混凝土板 (CC) 的变形, 沥青面层不会产生反射裂缝问题, 同时配筋

率又可低于 CRCP 板, CRC 板的施工技术标准也可低于普通混凝土板 (PCC) 和 CRCP 板, 是一种可充分利用当地资源和材料、结构强度高、使用寿命长、经济性和耐久性好的“资源节约”和“环境友好”型的路面结构。

(1) 刚柔复合式路面 CRC+ AC, 由于 CRC 配置了纵向钢筋和横向钢筋, 以抵制混凝土路面纵向收缩产生的断裂。连续配筋混凝土板除施工缝及构造需要的端部以外, 完全不需设置胀缝及缩缝, 形成一完整而平坦的行车表面, 从而改善了汽车行车的平稳性, 避免了普通混凝土路面的接缝破坏, 同时也增加了路面板的整体刚度, 提高承载能力、抗雨水作用。因此, 与普通混凝土板相比, 板体整体强度更高、承载能力更强、使用寿命更长、维修方便且费用更小。

(2) 刚柔复合式路面充分发挥不同路面材料的作用, 柔中有刚、刚柔相济、扬长避短。高强度的 CRC 刚性基层提高了沥青路面的承载能力, 满足重载、超载、大交通量等荷载条件的要求。AC 层改善和提高混凝土路面表面使用品质, 满足汽车高速行驶性能要求, 并且方便养护维修。水泥混凝土材料能充分利用当地材料与资源, 如水泥、粉煤灰、碎石、砂砾石、钢筋等, 促进当地经济发展并减少对我国相对较缺乏的石油资源的依赖。由于 CRC 板用作刚性基层, 能最大限度地利用地方性材料, 包括非规格材料和工业废品及副产品, 降低工程造价。

(3) 由于 CRC 板作为路面基层, 混凝土板的施工技术 with 质量标准可适当降低, 如抗滑、耐磨及平整度等指标, 可通过沥青面层来保证。

因此, 刚性部分作为路面的主要承载结构, 为面层提供了可靠的支持, 使弯沉、车辙减少, 并能相应减少柔性面层所需厚度。而柔性面层能提高路面舒适性, 降低噪音, 缓解荷载对刚性部分的冲击, 减少刚性面层的荷载疲劳应力和温度疲劳应力, 且便于维修。这种类型的复合式路面是一种使用性能良好的结构形式, 能充分满足重载交通条件下路面结构的耐久性要求, 是我国目前环境和条件下长寿命路面结构形式之一。

3 CRC+ AC 复合式路面层间界面结合技术

根据美国的研究资料显示^[10], 刚柔复合式路面由于缺乏层间的粘结力而产生滑移破坏的 AC 层模量和未发生滑移破坏的 AC 层模量有明显的区别, AC 层模量大的发生滑移的可能性小些, 而厚的 AC 层能抵消一部分层间粘结能力的不足。上下两层模量相

差太大则容易引起滑移现象。这项研究表明复合式路面层间滑移是较为普遍的道路病害,得到了各国道路研究者的重视。

因此,沥青面层与CRC板之间应设置有效的层间粘结结构,以保证沥青面层与CRC板之间的粘结强度,避免层间由于水平剪应力超过抗剪强度而发生剪切破坏。

CRC+AC层间界面结构目前可采用喷洒式、浸渍沥青土工布、铺装式等3种结构。

(1) 喷洒式结构为采用机械或人工喷洒一层沥青质的粘结材料,如橡胶改性沥青、SBS改性沥青、SBR改性沥青、热石油沥青(A-70)、SBR改性乳化沥青、普通乳化沥青等,应根据当地的气候条件、交通荷载条件、沥青面层厚度选用不同的粘结层材料及用量;厚度一般小于2.5mm,再撒一定数量的单一粒径碎石,一般为满铺碎石的45%~55%。

(2) 浸渍沥青土工布结构为采用机械或人工喷洒一层沥青或改性沥青,再摊铺一层聚酯长丝无纺土工布,即“一油一布”。为加强土工布中沥青的浸透,也可采用“两油一布”,即先洒一层沥青,摊铺土工布,再洒一层沥青,此时为方便施工,表面需再撒少量米石,结构层厚度一般小于3mm。

也可采用类似防水卷材的防水夹层材料,即工厂加工好的浸渍沥青的土工布,胎体材料应采用聚酯长丝无纺土工布,沥青应采用现场材料,结构层厚度一般小于4mm。

(3) 铺装式结构为机械摊铺一层类似于应力吸收层的薄层结构,如旧水泥混凝土路面上应用的STRATA应力吸收层,或高粘度高沥青用量的细粒式沥青混凝土,或浇注式沥青混凝土,一般厚度2~3cm;目前工程中应用较少,造价较高。

4 CRC+AC刚柔复合式路面的工程应用

目前CRC+AC复合式路面在国内的应用较少,现行《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40-2002)也只建议在高速公路建设中使用。2003年长沙理工大学与现代投资股份有限公司长潭分公司、湖南省高速公路管理局在湖南省长潭高速公路旧水泥混凝土路面改造工程中采用连续配筋混凝土复合式路面修筑了44.76km的试验路;2004年江苏省的沿江高速公路长寿命试验路结构方案中有两段采用CRC+AC结构,其中沥青面层采用10cm结构的620m和6cm改性沥青SMA-13结构的580m,CRC分别采用26cm和24cm。2005年江苏沪宁高速公路改扩建工程中修

筑了长670m、宽14.5m的CRC+AC的试验路。2006年长沙理工大学与现代投资股份有限公司长永分公司在长永高速公路黄花至永安段旧水泥混凝土路面改造工程中修筑了8km的实体工程。2007年河北省张石高速公路石家庄段修筑了40kmCRC+AC实体工程。2008年湖南省常吉高速公路计划修筑1kmCRC+AC试验路。

(1) 湖南省长潭高速公路CRC+AC复合式路面

湖南省长潭高速公路为京珠主干线的一段,全长44.76km,4车道,路基宽27.5m,原路面结构为水泥混凝土路面。1997年建成通车,经过6a多的运营,累计标准轴次已接近设计轴次,由于原结构设计较薄(25cm混凝土板+20cm水泥砂砾基层),重轴载较多(调查表明,轴重大于10t的有37.6%,而轴重大于13t的超重车也有22.98%),到路面改造时,损坏严重。为适应重载交通的要求,弥补原结构上的不足,在对原旧水泥混凝土路面进行换板、压浆、清缝、灌缝等处理后,采用连续配筋混凝土补强调平层后,再加铺10cm沥青面层的改造方案。如表1所示。

表1 长潭高速公路连续配筋混凝土加铺层复合式路面结构

Tab 1 Continuously reinforced concrete overlay composite pavement structure of Changsha-Xiangtan expressway

结构层	混凝土加铺层复合式路面结构材料与厚度
表面层	4cmSBS改性沥青SMA-13(木质素纤维)
粘层	0.3~0.6l/m ² 改性乳化沥青
下面层	6cmSBS改性沥青AC-20J
粘结防水防裂层	浸渍1.40kg/m ² 重交通沥青(AH-70) 聚酯长丝烧毛土工布
补强、调平层	18cm连续配筋混凝土
隔离层	2.5cm沥青混合料AC-10I
粘层	0.3~0.5l/m ² 乳化沥青或0.3~0.6kg/m ² 重交通沥青AH-70
旧混凝土板	换板压浆处治旧混凝土板

连续配筋混凝土板纵向钢筋采用直径18mm的II型钢筋,间距24cm,配筋率0.6008%。计算可得:裂缝间距1.632m,在1~2.5m之间;裂缝宽度0.93mm,小于1mm;钢筋应力168MPa,小于钢筋屈服强度335MPa。横筋采用直径14mm的II型钢筋,间距80cm,配筋率0.1069%,纵向配筋率为横向配筋率的5.62倍,符合规范。路面改造工程于2003年实施,2003年底完工,经过近4a的使用效果良好。

(2) 江苏省沿江高速公路CRC+AC试验路

2004年江苏省的沿江高速公路长寿命试验路结构方案中有两段采用CRC+AC结构,其中沥青面层

采用 10 cm (4 cm 改性沥青 SMA-13+ 6 cm 改性沥青 AC-20) 结构的 620 m 和 6 cm 改性沥青 SMA-13 结构的 580 m, CRC 分别采用 26 cm 和 24 cm, 以适应不同的交通量, 结构见图 1。

试验段 1(620 m)	试验段 2(580 m)
4 cm SMA-13	6 cm SMA-13
6 cm CDAC-20	
26 cm CRCP 面板 1 cm 沥青胶砂下封层	24 cm CRCP 面板 1 cm 沥青胶砂下封层
20 cm 水泥稳定碎石基层	26 cm 水泥稳定碎石基层
20 cm 二灰土底基层	20 cm 二灰土底基层

图 1 江苏省沿江高速公路 CRC+ AC 试验路结构

Fig 1 CRC+ AC test road structure of riverain expressway in Jiangsu Province

(3) 江苏省沪宁高速公路 CRC+ AC 试验路

2005 年江苏沪宁高速公路改扩建工程中修筑了长 670 m、宽 14.5 m 的 CRC+ AC 试验路, 见表 2, 结构为 4 cm 改性沥青 SMA-13+ 8 cm 改性沥青 Sup-19+ 26 cm CRC+ 20 cm 水泥稳定碎石+ 20 cm 石灰土。

表 2 江苏省沪宁高速公路 CRC+ AC 试验路结构

Tab 2 CRC+ AC test road structure of the section of Shanghai-Nanjing expressway in Jiangsu Province

路面结构层	结构层厚度与材料
沥青上面层	4 cm SBS 改性沥青 SMA-13
沥青下面层	8 cm 改性沥青 Sup-19
承重层	26 cm 连续配筋混凝土板 CRC
基层	20 cm 水泥稳定碎石
底基层	20 cm 石灰土

(4) 湖南省长永高速公路 CRC+ AC 复合式路面

2006 年长沙理工大学与现代投资股份有限公司长永分公司在长永高速公路黄花至永安段旧水泥混凝土路面改造工程中修筑了 8 km 的 CRC+ AC 实体工程, 路面结构见表 3。

表 3 湖南省长永高速公路黄花到永安段 CRC+ AC 结构

Tab 3 CRC+ AC structure of Huanghua-Yong' an section of Changsha-Yong' an expressway in Hunan Province

结构层	连续配筋混凝土复合式加铺层路面结构材料与厚度
表面层	4 cm SBS 改性沥青 SMA-13(木质素纤维)
粘层	0.3~ 0.6 l/m ² 改性乳化沥青
下面层	5 cm SBS 改性沥青 AC-20
粘结防水层	1.6~ 1.8 kg/m ² SBS 改性沥青粘结防水层
补强调平层	18 cm 连续配筋混凝土(路肩板没有配筋)
隔离层	2.5 cm 沥青混合料 AG-10
粘层	0.3~ 0.5 l/m ² 乳化沥青
旧混凝土板	换板压浆处治旧混凝土板

(5) 河北省张石高速公路 CRC+ AC 复合式路面
2007 年河北省张石高速公路石家庄段修筑了 40 km CRC+ AC 实体工程, 路面结构见表 4。

表 4 河北省张石高速公路石家庄段 CRC+ AC 结构

Tab 4 CRC+ AC structure of Shijiazhuang section of Zhangjiakou-Shijiazhuang expressway in Hebei Province

沥青面层	6 cm 改性沥青 SMA-16
粘层	热洒 SBS 改性沥青
CRC 层	28 cm CRC 板
基层	4 cm AC-13
封层+透层	热洒 70 号沥青+ 乳化沥青
底基层	18 cm 水泥碎石
垫层	16~ 20 cm 级配碎石

(6) 湖南省常吉高速公路 CRC+ AC 试验路

湖南省交通厅科技计划项目“湖南公路路面典型结构及修建技术研究”课题组决定 2008 年在湖南省常吉高速公路修筑 1 km CRC+ AC 试验路, 路面结构见表 5。

表 5 湖南省常吉高速公路 CRC+ AC 试验路结构

Tab 5 CRC+ AC test road structure of the Changde-Jishou expressway in Hunan Province

路面结构层	结构层厚度与材料
沥青面层 h_a	6 cm RMB+ Domix 复合改性沥青 SMA-16
粘结防水防裂层	SBS+ RMB 复合改性沥青+ 单粒径碎石
承重层 h_c	26 cm 连续配筋混凝土板 CRC
基层	19 cm 6% 水泥稳定碎石(6 MPa)
底基层	18 cm 水泥碎石(3 MPa)
结构层总厚度	69 cm

5 结论

根据国内外的研究与应用情况, CRC+ AC 具有较好的承载能力和较长的使用寿命, 能满足重载交通长寿命路面的要求, 是我国干线高速公路路面结构的发展方向之一。

由于 CRC+ AC 在我国的研究与应用较少, 它的很多性能特性并不是很了解, 需要大量的试验和工程实践来掌握它, 这样才能扬长避短, 充分发挥其结构效能。其中值得重视的是, 由于 CRC 与 AC 的回弹模量相差较大, AC 层与 CRC 层结合界面容易因为抗剪能力不足而引起滑移、拥包和分层等病害, 故层间抗剪强度是一项重要的设计指标。

CRC+ AC 刚柔复合式路面结构通过近几年的研究、试验与应用, 尤其是在交通量大、重车多、轴重大的京珠高速公路湖南长潭段 44.76 km 近 4 a 来的应用, 效果良好, 为其推广应用打下了基础, 也开创了我国重载交通高速公路长寿命路面结构的新型式。

参考文献:

References:

- [1] 贺广华, 邓义波. 高速公路修修补补何时了(监督与思考) [N]. 人民日报, 2006-05-30(5).
HE Guang-hua, DENG Yi-bo. When Expressway Repairing Done? (Inspiration and Thought) [N]. People's Daily, 2006-05-30(5).
- [2] 胡长顺, 王秉纲. 复合式路面设计原理与施工技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
HU Chang-shun, WANG Bing-gang. Design Principle and Construction Technique of Composite Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [3] JTG D40-2002, 公路水泥混凝土路面设计规范 [S].
JTG D40-2002, Specification of Cement Concrete Pavement Design for Highway [S].
- [4] JTG F30-2003, 公路水泥混凝土路面施工技术规范 [S].
JTG F30-2003, Technical Specification for Construction of Highway Cement Concrete Pavements [S].
- [5] JTG D50-2006, 公路沥青路面设计规范 [S].
JTG D50-2006, Specification for Design of Highway Asphalt Pavement [S].
- [6] 邓学钧, 陈荣生. 刚性路面设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
DENG Xue-jun, CHEN Rong-sheng. Design of Rigid Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 1993.
- [7] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1999.
YAO Zu-kang. Design of Cement Concrete Pavement [M]. Anhui: Anhui Science & Technology Press, 1999.
- [8] 黄卫, 钱振东. 高等级水泥混凝土路面设计理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.
HUANG Wei, QIAN Zheng-dong. The Design Theory and Method of High Grade Cement Concrete Pavement [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [9] 邓学钧, 黄晓明. 路面设计原理与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
DENG Xue-jun, HUANG Xiao-ming. Design Principle and Method of Pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [10] LUTHER M S, MAJIDZADEH K, CHANG C W. Mechanistic Investigation of Reflection Cracking of Asphalt Overlays [J]. Transportation Research Record, 1976, 572: 111-122.
- [11] 倪富健, 卢杨, 顾兴宇, 等. 沥青混凝土与连续配筋混凝土复合式路面承载力分析 [J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 43-48.
NI Fu-jian, LU Yang, GU Xing-yu, et al. Carrying Capacity Analysis of Asphalt Concrete and Continuously Reinforced Concrete Composite Pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 43-48.
- (上接第53页)
- [7] 双德斯 PT. 突变理论入门 [M]. 凌复华, 译. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1983.
SAUNDERS P T. Entering of Catastrophe Theory [M]. Translated by LING Fu-hua Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1983.
- [8] THOMPSON J M T, SHAMROCK P A. Hyperbolic Umbilici Catastrophe in Crystal Fracture [J]. Nature, 1976, 26: 598-599.
- [9] CARPENTARIA A. A Catastrophe Theory Approach to Fracture Mechanics [J]. International Journal of Fracture, 1990, 44(1): 57-69.
- [10] 张跃, 邹寿平, 宿芬. 模糊数学方法及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
ZHANG Yue, ZOU Shou-ping, SU Fen. Method of Fuzzy Mathematics and Its Application [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992.
- [11] 徐卫亚, 蒋中明, 石安池. 基于模糊集理论的边坡稳定性分析 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 409-413.
XU Wei-ya, JIANG Zhong-ming, SHI An-chi. Slope Stability Analysis Using Fuzzy Sets Theory [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 409-413.
- [12] 何金平, 李珍照. 基于突变理论的大坝安全动态模糊综合分析与评判 [J]. 系统工程, 1997, 15(5): 39-43.
HE Jin-ping, LI Zhen-zhao. The Method of Fuzzy Comprehensive Dynamic Analyzing and Evaluating Dam Safety Based on Catastrophe Theory [J]. Systems Engineering, 1997, 15(5): 39-43.
- [13] 许传华, 任青文. 地下工程围岩稳定性的模糊综合评判法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11): 1852-1855.
XU Chuan-hua, REN Qing-wen. Fuzzy-synthetic Evaluation on Stability of Surrounding Rock Masses of Underground Engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(11): 1852-1855.