

基于沥青混合料疲劳损伤细观力学性能的预防性养护研究^{*}

朱默¹, 黄博², 李友云², 李懿²

(1.湖南省莲株高速公路建设开发有限公司, 湖南 株洲 412000; 2.长沙理工大学, 湖南 长沙 410114)

摘要: 为提高沥青路面的使用性能, 延长其使用寿命, 对沥青路面提出一种基于混合料疲劳损伤过程中细观力学性能的预防性养护维修方法, 通过 AC-13C 及其细观组分的等效基体劈裂疲劳损伤试验和 CT 扫描对沥青混合料内部疲劳损伤进行分析, 从细观尺度把沥青路面的使用期分成不同疲劳损伤阶段, 在不同疲劳损伤阶段采用不同的养护方法与维护措施, 系统地制订沥青路面预防性养护方案。

关键词: 公路; 沥青路面; 疲劳损伤; 细观分析; 预防性养护

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)01-0076-05

目前, 中国沥青路面养护维修中主要考虑的是公路技术状况, 根据“坏路优先”或在资金许可时的“即坏即修”原则进行决策, 尚未将沥青路面全寿命使用期内的经济和技术效益作为养护决策分析依据, 也未将环境负荷、交通影响程度等作为养护决策的效能评价指标, 普遍存在养护决策方法简单、养护资金不落实、科学化程度不高、养护工艺落后、养护机制不健全等问题, 养护质量得不到保障。该文通过创新养护维修理论, 提出一种基于沥青混合料疲劳损伤过程中细观力学性能的预防性养护维修方法。

1 等效基体劈裂疲劳损伤性能试验

1.1 配合比设计

分析集料最大公称粒径减小对沥青混合料力学及疲劳损伤特性的影响。为获取其弹性参数, 以 AC-13C 配合比为依据, 去除粒径 ≥ 2.36 mm 的集料, 利用剩余各档集料质量比不变及集料总比表面积与沥青用量比值不变的原则设计试件进行力学及

疲劳损伤性能试验。

根据基体材料中各档集料的筛余百分率、基体油石比、沥青和各档集料的密度, 计算得到各档集料及沥青的体积比; 由试件的总体积得到各档集料及沥青的体积, 由各档集料及沥青的密度得到各档集料及沥青的质量。通过某级配合比设计, 类比得到其他各级等效基体配合比设计方案(见表 1)。

1.2 试验方案

先进行 AC-13C 及其等效基体 AC-9.5、AC-4.75、AC-2.36、AC-1.18 劈裂强度试验, 测定劈裂强度, 在此基础上, 以 0.3 的应力比用 UTM 试验系统进行各试件不同损伤程度劈裂疲劳损伤试验, 并通过 MTS-810 测量不同损伤程度下 AC-13C 及其等效基体的劈裂回弹模量, 分析上述材料的强度衰减规律与刚度退化规律, 对比分析 AC-13C 与其等效基体疲劳损伤的区别。

为了解 AC-13C 及其等效基体在相同条件、不同加载次数下的剩余强度和剩余劈裂回弹模量,

表 1 各级等效基体的级配

级配类型	通过下列筛孔(方孔筛, mm)的质量百分率/%										油石比/%
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
AC-13C	100	98	72.0	43.0	36.0	30.0	20.0	15.0	9.0	6.0	5.3
AC-9.5		100	73.5	43.9	36.7	30.6	20.4	15.3	9.2	6.1	5.4
AC-4.75			100.0	59.7	50.0	41.7	27.8	20.8	12.5	8.3	7.4
AC-2.36				100.0	83.7	69.8	46.5	34.9	20.9	14.0	12.3
AC-1.18					100.0	83.3	55.6	41.7	25.0	16.7	14.0

* 基金项目: 湖南省交通运输厅项目(201707)

先大概确定各材料在试验条件下的疲劳寿命,再在第一组试验中测出其在相同状况下的疲劳寿命。如果测试结果和相关资料大概一致,则取均值作为其疲劳寿命 N_f ; 若不一致,则再在相应材料上加一组疲劳试验(3 个试件),将其试验结果和上面对应的 3 个疲劳试验结果一起求平均值,求得 6 个试件的疲劳寿命均值作为该沥青混合料的疲劳寿命 N_f 。

2 基于 CT 图像的沥青混合料疲劳损伤细观规律分析

根据 AC-13C 及其细观组分的等效基体劈裂疲劳损伤试验结果,沥青混合料在疲劳损伤过程中的强度、刚度下降趋势呈明显的非线性,且呈现 3 个阶段,即在疲劳寿命的初期强度、刚度缓慢下降,中期下降速率明显增大,后期下降速率急剧增大(见图 1、图 2)。

把沥青混合料当作均质体难以分析其疲劳损伤机理及早期破坏现象,而由细观尺度分析沥青混合料因非均匀性导致应力集中进而引起的局部疲劳损伤,可得到其疲劳损伤起始位置及演化规律。图 3、图 4 分别为 AC-13C 在不同疲劳损伤下的 CT 扫

描图像及数据模拟典型应力云图。

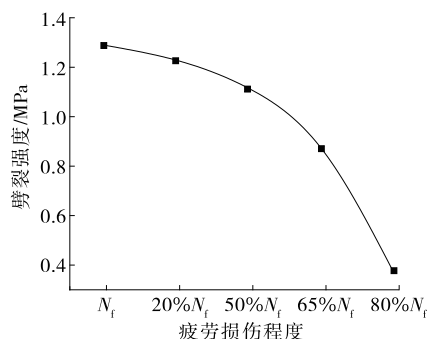


图 1 沥青混合料强度和疲劳寿命的变化规律

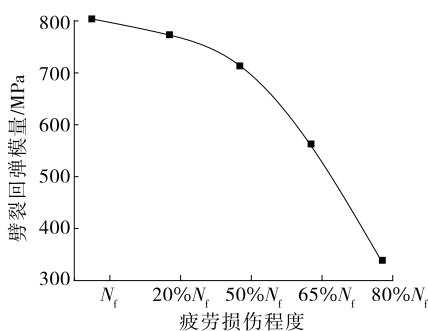


图 2 沥青混合料刚度和疲劳寿命的变化规律

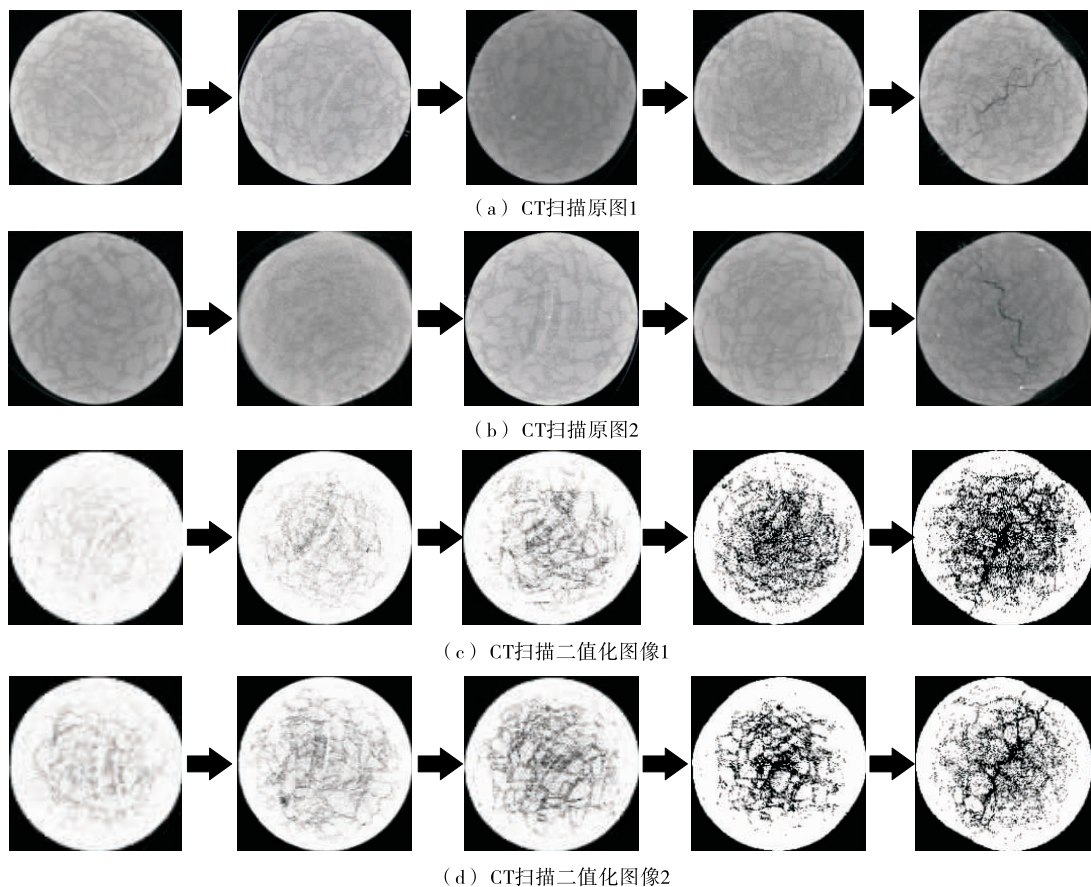


图 3 AC-13C 不同疲劳损伤状态下的 CT 图像

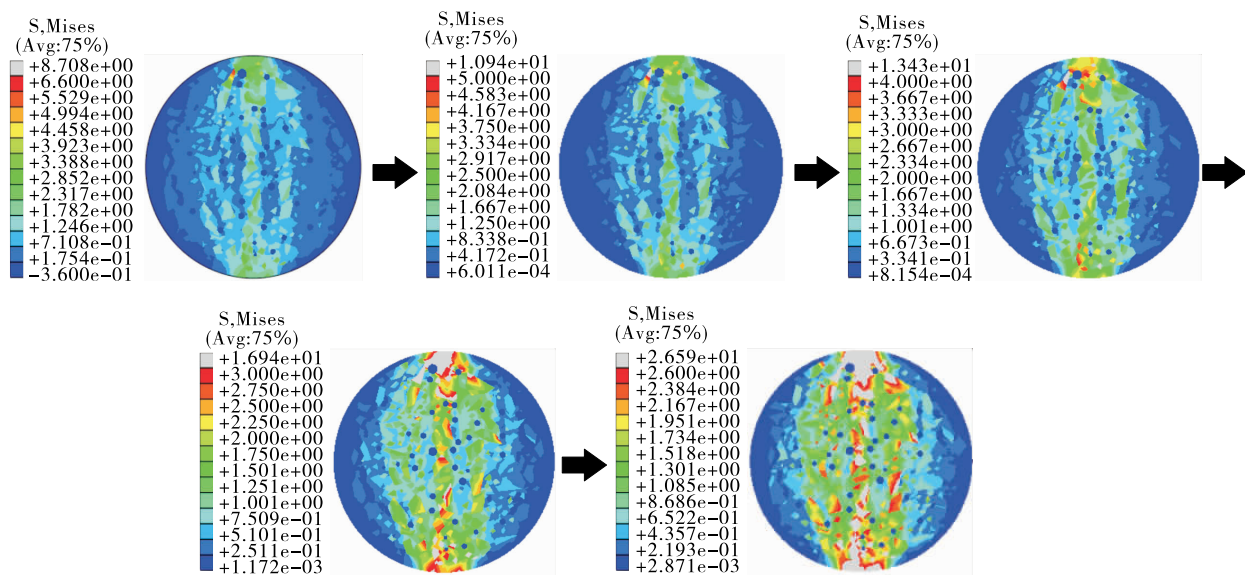


图4 AC-13C细观模型下不同疲劳损伤状态的典型应力云图(单位: mm)

由图3、图4可知:1)由细观尺度分析AC-13C在不同疲劳损伤程度下的内部应力表现为明显的非均匀性,表明把沥青混合料当作均质体不合理。均质体难以反映沥青混合料内部结构的应力集中及早期局部破坏,而由细观尺度能从疲劳损伤发展源、疲劳损伤机理及疲劳损伤演化来分析其结构内部应力集中情况及早期局部损伤。2)在疲劳损伤初期,沥青混合料损伤较小,应力集中程度也较小,其损伤源于粗骨料尖角处的沥青胶浆,原因是在循环荷载作用下粗集料尖角刺破沥青膜(胶浆)而产生细观裂缝,导致沥青混合料沥青胶浆发生损伤。大部分损伤源是由粗集料的棱角刺破沥青膜(胶浆)所致,粗集料的棱角性容易导致其内部结构应力集中。随着循环荷载的进一步作用,沥青混合料进入疲劳损伤中期,前期被刺破的沥青膜(胶浆)导致其宏观力学性能下降,粗集料强度远大于沥青胶浆,细观裂缝大致沿与受力平行沥青胶浆方向发展,遇到粗集料则绕开,逐步产生多条宏观裂缝,此时细集料在抵抗疲劳损伤方面起关键作用。到了疲劳损伤晚期,沥青混合料小裂缝与小裂缝不断汇合,形成多条大致平行于受力方向的大裂缝,且骨料与骨料之间的嵌挤作用增强,此时粗集料与粗集料之间的相互作用在抵抗损伤方面起关键作用。

粗集料的棱角性在沥青混合料结构中起关键作用,一方面,棱角性好的粗集料有利于它们之间的嵌挤作用,使沥青混合料的强度增加;另一方面,棱角性太好会在疲劳损伤初期刺破沥青膜(胶浆),使沥

青混合料产生疲劳损伤源,影响沥青混合料的疲劳寿命。参考相关文献,得到粗集料棱角性与沥青混合料强度、疲劳寿命的关系(见图5、图6)。

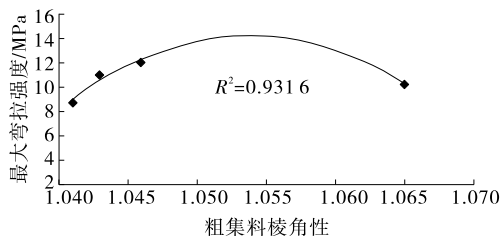


图5 粗集料棱角性与-10℃小梁弯拉强度的关系

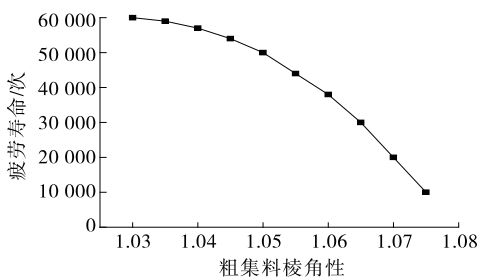


图6 粗集料棱角性与15℃沥青混合料劈裂疲劳寿命的关系

沥青混合料的细观结构影响其强度及疲劳寿命,当前沥青混合料设计方法存在较大缺陷,无法反映集料的细观特征。由图5、图6可知:1)沥青混合料的强度随着粗集料棱角性的增大先增大后减小,先增大的原因是在棱角性较小时,棱角性增大有利于骨料与骨料之间的嵌挤作用,使其强度增大,而增加到一定程度时,骨料与骨料之间的嵌挤已足够紧密,再增加棱角性对其强度影响较小,且棱角性过大

会导致骨料易于压碎,进而导致其强度下降。粗集料棱角性为 1.055 左右时,沥青混合料的强度最大。2) 沥青混合料的疲劳寿命随着粗集料棱角性的增大呈减小趋势且减小速率不断增大,棱角性 1.05 左右为其下降速率的一个拐点。综合考虑强度与疲劳寿命,沥青混合料设计时将粗集料棱角性控制在 1.05 左右较合理。

根据上述沥青混合料细观疲劳损伤规律及特性,沥青路面使用寿命、行驶质量的下降趋势也呈明显的非线性,在沥青路面使用初期,其使用性能指标降低较缓慢,主要是其结构中沥青混合料粗集料的尖角处刺破沥青膜(胶浆)导致发生疲劳损伤,其为疲劳损伤源。如果此时不加以预防性养护措施,任由其使用性能指标降低,前期被刺破的沥青膜(胶浆)会进一步导致其宏观力学性能下降,细观裂缝大致沿着与受力平行沥青胶浆的方向发展,到一定程度后,沥青路面的使用性能会加速下降,出现较大纵、横向裂缝,进而出现孔洞、坑槽等,水分进入沥青路面内部,在行车荷载作用下,路面内部粗集料颗粒包裹的沥青膜逐步脱落,使路面承载力下降,使用性能急速降低。目前绝大部分沥青路面养护维修是在任由其使用性能指标下降到一定程度,对行车造成困扰后才采取养护维修措施,是被动、不经济、落后的养护维修。而预防性养护是在沥青路面使用性能较好、病害出现之前就开始进行相应养护维修,可提高沥青路面服务能力和行驶质量,延长其使用寿命。在沥青路面使用寿命周期内,预防性养护相比传统养护能大大降低养护所需资金,减缓道路养护部门资金压力,提高道路行车安全性。图 7 为沥青路面使用性能随使用寿命的下降趋势。根据图 7,在前期使用寿命的 75% 其性能才下降 40%,而之后 12% 使用寿命其性能也下降 40%,再次表明沥青路面在使用过程中性能呈现衰减加速,且在衰减过程中存在突变点。

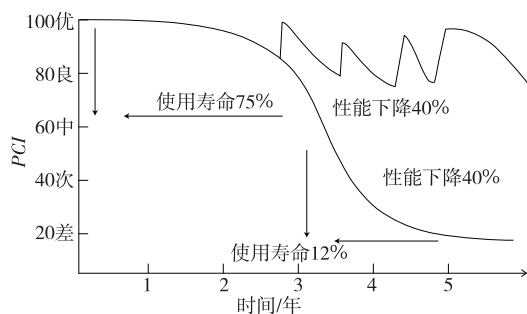


图 7 沥青路面使用性能和寿命的变化规律

基于上述理论,提出基于沥青混合料疲劳损伤过程中细观力学性能的预防性养护维修技术。根据沥青路面中沥青混合料疲劳损伤过程中细观力学性能的发生、演化、破坏规律进行预防性养护维修,通过检测沥青路面强度、刚度、损害度等宏观指标(见图 8、图 9),在细观尺度通过 CT 扫描及数字图像处理得到沥青路面中沥青混合料的空隙率、CT 数等细观指标(见图 10、图 11),将宏观尺度与细观尺度相结合进行沥青路面预防性养护科学决策。

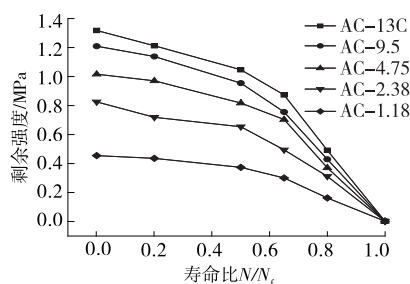


图 8 沥青混合料相同寿命比下剩余强度

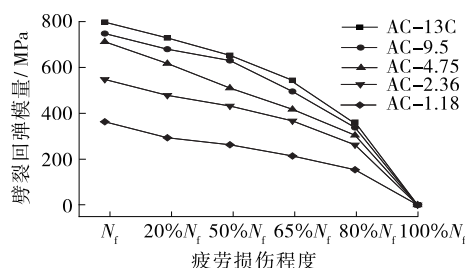


图 9 沥青混合料相同寿命比下劈裂回弹模量

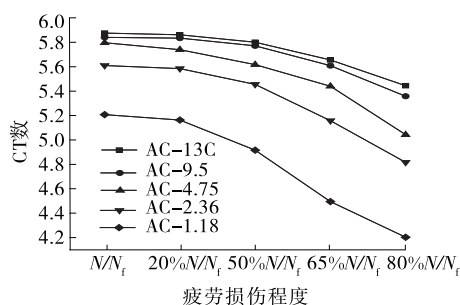


图 10 沥青混合料不同损伤下 CT 数对比

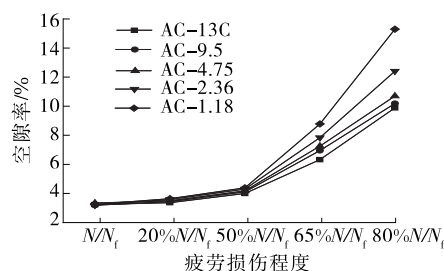


图 11 沥青混合料不同损伤下空隙率对比

由图8~11可知:各沥青混合料的力学性能、CT数随着疲劳寿命的增加呈下降趋势,空隙率随着疲劳寿命的增加而递增。各混合料的性能呈规律性变化,从无疲劳损伤到 $50\%N/N_f$ 其下降或增长速率缓慢,称为稳定变化阶段;由 $50\%N/N_f$ 到 $65\%N/N_f$ 其变化速率明显增加,称为加速变化阶段;而 $65\%N/N_f$ 以后其变化速率急剧增加,称为极速变化阶段。在稳定变化阶段,每 $10\%N/N_f$ AC—13C的强度下降0.053 4 MPa,劈裂回弹模量下降28.48 MPa,CT数下降0.014 8,空隙率上升0.15%;在加速变化阶段,每 $10\%N/N_f$ 其强度下降0.114 MPa,劈裂回弹模量下降72 MPa,CT数下降0.095 3,空隙率上升1.53%;在极速变化阶段,每 $10\%N/N_f$ 其强度下降0.245 1 MPa,劈裂回弹模量下降153 MPa,CT数下降0.138 7,空隙率上升2.302%。

3 基于混合料疲劳损伤细观力学性能的预防性养护时机及养护措施

沥青路面养护科学决策需考虑两方面需求,一是路况指标达不到规定技术要求时需采取的养护措施,二是路况指标虽达到技术要求,但根据全寿命周期费用分析的需要而采取的预防性养护措施,且决策结果最终要落实到养护规划和养护计划编制上。预防性养护不属于大中修、专项养护和日常养护范畴,它根据沥青路面疲劳损伤过程中细观性能演化规律及路况指标、大修或改建后使用年限、交通量等指标进行决策。

新建沥青路面在前期其路用性能处于稳定发展阶段,主要是结构中粗集料尖角处刺破沥青膜(胶浆)导致疲劳损伤,这是疲劳损伤源,如果此时不加以预防性养护,任由其使用性能指标降低,则前期被刺破的沥青膜(胶浆)会进一步导致其宏观力学性能下降。沥青路面在使用中期其路用性能处于加速发展阶段,主要是结构中前期被刺破的沥青膜(胶浆)及表面的微裂缝自上向下发展导致其宏观力学性能下降,粗集料强度远大于沥青胶浆,细观裂缝大致沿着与受力平行的沥青胶浆中发展,随着循环交通荷载的进一步作用,其路用性能下降较快,进入加速发展阶段的中后期其细观力学性能的演化速率明显增加,进而导致沥青路面宏观上的疲劳破坏加速。沥青路面在使用晚期其路用性能处于极速发展阶段,基体与骨料之间完全脱离,沥青路面的使用性能呈

现加速下降趋势,开始出现较大纵、横向裂缝,接着出现坑槽、孔洞,水分进入路面内部,在行车荷载作用下,路面内部粗集料颗粒包裹的沥青膜开始脱落,承载力下降,使用性能急速下降。根据上述细观特征,结合路况指标、使用年限、交通量等指标确定早、中、晚3个时期预防性养护时机及养护措施。

(1) 早期预防性养护时机及养护措施。从细观上看,沥青路面在早期的疲劳损伤主要是微表层产生疲劳损伤,由于其直接与车轮接触、受力较大且所处环境最恶劣,早期疲劳损伤形式是结构中沥青混合料的沥青膜被粗集料尖角刺破而产生微裂纹。据此确定早期预防性养护采用含砂雾封层与微表处技术。含砂雾封层采用由改性乳化沥青或煤沥青基材料、陶土等添加剂、石灰岩或玄武岩细粒砂组成的混合料,用专业的高压喷洒车在沥青路面上喷洒形成薄层。微表处采用由改性乳化沥青、细矿料、添加剂和水按合适比例组成的混合料,采用专用稀浆摊铺车进行施工。含砂雾封层及微表处中的乳化沥青可渗透到沥青路面微表层,填补粗集料刺破的沥青膜,修补结构中沥青混合料早期损伤,从而延缓沥青路面早期疲劳损伤的发生、发展;还能封闭沥青路面表面的微裂缝,防止微裂缝自上往下发展及水分下渗,显著延长沥青路面性能稳定发展期。

(2) 中期预防性养护时机及养护措施。从细观上看,沥青路面在中期的疲劳损伤主要是微表层疲劳损伤沿着沥青胶浆发展,微裂纹发展为宏观裂缝。据此确定中期预防性养护采用碎石封层技术,在旧沥青路面强度符合要求的条件下,对原沥青路面进行清扫及简单处理,直接洒布沥青、撒布碎石经碾压后形成薄层。沥青可渗透沥青路面微表层修补一部分疲劳损伤,沥青与碎石能较好地填补沥青路面表面被损伤的沥青胶浆。

(3) 晚期预防性养护时机及养护措施。从细观上看,沥青路面在晚期的疲劳损伤是宏观裂缝进一步发展,主要是基体与骨料之间完全脱离,各小裂缝不断发展或汇合形成多条较大的宏观裂缝。据此确定晚期预防性养护主要采用薄层罩面,在旧沥青路面上铺设一层较厚的改性乳化沥青,然后马上铺筑热拌沥青混合料,紧接着压路机进行碾压成型,摊铺厚度10~30 mm。薄层罩面技术给原沥青路面提供一个崭新的表面,对原疲劳损伤的路面起到隔离作用,改善原沥青表面的环境,行车循环荷载不直接

(下转第101页)

表 3 互通立交设计方案比较

方案 编号	方案共同点	方案不同点	交叉口方案	引起的 其他工程	对地块 的影响	景观 影响	投资规 模/亿元
方案一	不改造湘府路大桥梁	跨线桥过新联路	十字路口(新联路)	无	小	较小	1.05
方案二	段;湘府路主线均以	隧道下穿新联路	十字路口(新联路)	无	小	较小	2.10
方案三	隧道形式下穿书香路	地面阻隔新联路	右进右出交叉口(新联路)	新联路横向跨线桥	大	较大	0.50

由表 3 可知:3 种方案仅在新联路的处理上不同。方案三造价最小,但阻隔了新联路交通,且地面快速路形式对周边地块的影响较大,不利于周边地块的开发建设。方案一与方案二均满足转向交通需求,但方案二隧道较长,工程费用较高。经综合比选,推荐采用方案一,即湘府路主线接湘府路大桥挡墙段,以跨线桥形式过新联路后落地,在书香路前设置隧道下穿。

由于设计标高发生变化,推荐方案需拆除现状桥接坡两侧挡墙,按照设计方案新建挡墙。另外,经过验算,该方案中凹曲线视距能满足视距要求。

3 结语

通过对湘府路大桥互通立交设计方案的对比研究,总结出城区互通立交建设中需着重考虑的因素:1) 优先考虑互通立交相关道路的等级、设计速度、交通量和交通规划等因素;2) 选型必须与当地施工条件相适应,尽量减少征地和土方工程,减少工作

量,并尽量减少对现有项目的影响;3) 互通立交方案的最终选择需综合考虑交通量、土地利用、地块、造价及可行性等因素。

参考文献:

[1] 高速公路丛书编委会.高速公路立交工程[M].北京:人民交通出版社,2001.

[2] 孙家驷.道路立交规划与设计[M].北京:人民交通出版社,2009.

[3] 邵向阳,李钰春.高速公路互通立交的合理选型研究[J].公路交通科技:应用技术版,2010(5).

[4] 姜晓彬.某城市道路与高速公路立交方案设计[J].山西建筑,2010,36(8).

[5] 唐德文.城市快速路辅路功能定位分析及设计标准[J].城市道桥与防洪,2012(7).

[6] 胡海晨.产权不同高速公路顺接时的互通问题分析[J].公路与汽运,2018(1).

收稿日期:2019—03—11

(上接第 80 页)

作用于原沥青表面,进而延长其疲劳寿命,增加行车安全性;也使沥青路面原有的许多表面破坏如裂缝、辙槽、坑洞等得到有效治理。

4 结论

(1) 均质体难以反映沥青混合料内部结构的应力集中及早期局部破坏,而根据细观尺度能从疲劳损伤的发展源、疲劳损伤机理及疲劳损伤演化分析结构内部应力集中情况及早期局部损伤。

(2) 沥青路面的使用寿命、行驶质量下降趋势呈现明显的非线性,使用性能呈现加速下降趋势,即前期稳定变化、中期加速变化、后期极速变化。

(3) 沥青路面使用性能处于稳定变化阶段的中后期,可采用早期预防性养护,主要采用含砂雾封层技术与微表处技术;处于加速变化阶段的中后期,可采用中期预防性养护,主要采用碎石封层技术;处于

极速变化阶段的前期,可采用晚期预防性养护,主要采用薄层罩面。

参考文献:

[1] 郑健龙,周志刚,张起森.沥青路面抗裂设计理论与方法[M].北京:人民交通出版社,2002.

[2] 周亮,凌建明,林小平.考虑环境因素的沥青路面疲劳开裂预估模型[J].中国公路学报,2015,26(6).

[3] 杨毅.不同加载频率下沥青混合料疲劳损伤特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.

[4] 石立万.基于细观力学性能的功能型沥青混合料研究[D].广州:华南理工大学,2014.

[5] 谢兆星.集料特性对沥青混合料性能影响研究[D].西安:长安大学,2006.

[6] 袁明园.集料棱角性对沥青混合料性能的影响研究[D].西安:长安大学,2011.

收稿日期:2019—05—08