

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.03.011

无切缝水泥混凝土路面设计与建造

张 君¹, 陈切顺², 王振波¹, 陈崇哲², 郭自力¹, 傅玉勇³

(1.结构安全与耐久教育部重点实验室(清华大学), 北京 100084; 2.河北省廊坊市交通公路工程有限公司, 河北 廊坊 065000; 3.天津华夏建筑设计有限公司, 天津 300000)

摘 要: 水泥混凝土路面具有使用寿命长、养护工作量小、能耗低、施工简便等优点,但是水泥混凝土路面行车舒适度不如沥青混凝土路面。而舒适度不佳最主要原因是切缝的存在,使行车时产生“咯噔”跳车现象。此外,切缝的存在也将严重影响混凝土路面的耐久性,增加维修维护费用。针对上述问题,提出并实践了无切缝水泥混凝土路面设计与建造技术。设置高延性低干缩纤维增强水泥基复合材料(low shrinkage engineered cementitious composites)延性段取代传统混凝土路面切缝, LSECC 可形成多条细微裂纹吸收两侧混凝土路面板的收缩和温度变形。通过施工现场模具和工艺设计,实现了界面锚固钢筋的定位和 LSECC 后浇空间预留及反射裂缝的定位,模具拆除后进行 LSECC 材料浇筑,实现了无缝路面的设计理念。

关键词: 水泥混凝土路面; 无切缝; 延性段; 设计; 建造

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)03-0068-06

Design and construction of jointless concrete pavement

ZHANG Jun¹, CHEN Qieshun², WANG Zhenbo¹, CHEN Chongzhe², GUO Zili¹, FU Yuyong³

(1.Key Laboratory of Structural Safty and Durability(Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084, China;

2.Langfang Transportation and Highway Engineering Co., Ltd., Langfang 065000, Hebei, China;

3.Tianjin Huaxia Architecture Design Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: Concrete pavement is widely used due to its long service life, low maintenance requirements, low energy consumption and simple construction. However, the driving comfort of concrete pavement is normally lower than that of asphalt pavement due to the existence of cutting joints. Meanwhile, the cutting joints may reduce the durability of concrete pavement that in turn increases the maintenance cost as well. In order to solve these problems, this paper presents a novel construction technique of concrete pavement, called jointless concrete pavement. By setting low shrinkage engineered fiber reinforced cementitious composite (LSECC) strips at the place of cutting joints of conventional concrete pavement, it is possible to localize the fine cracks into the LSECC strip instead of cracking in adjacent concrete slabs. The design methods for length of the ductile strip and the parameters of anchoring bars were proposed. The concept and design method of jointless concrete pavement was successfully used in practice.

Keywords: concrete pavement; jointless; ductile strip; design; construction

水泥混凝土路面具有使用寿命长、养护工作量小、能耗低、施工简便等优点,因此在国内外获得了广泛使用^[1-2]。在美国高速公路网中,水泥混凝土路面近 50%。在欧洲也有大量的混凝土路,例如比利时近 50%的高速路是水泥混凝土路,法国每年建成的高速公路 30%为混凝土路。中国水泥混凝土路修筑起步较晚,1970 年仅为 200 km,约占各级路面总量的 0.9%;1980 年为 1 600 km,约占各级路面总量的 0.9%;近年来水泥混凝土路面里程数大幅度提升,2000 年达到 11 5754 km,占各级路面总量的 65%;2012 年各类水泥混凝土路面已达 1 653 200 km。但与沥青路面相比,水泥混凝土路面所占比例近年有所

下降,尤其在高等级公路中所占比例更小。形成上述现象的最主要原因是水泥混凝土路面行车舒适度不如沥青混凝土路面,而舒适度不佳与混凝土材料的脆性特征有很大相关性。

水泥混凝土在凝结硬化的过程中产生收缩,混凝土路面板的收缩变形受到路基约束,将会在面板中形成拉应力。拉应力超过混凝土抗拉强度时即产生脆性开裂。本文课题组在前期应用收缩应力模型分析了混凝土路面板中收缩应力分布规律^[3],路面板模型如图 1 所示。随着混凝土收缩的发展,拉应力由路面板两端向板中间线性增大,并在板中间达到峰值。路面板收缩应力的分布规律如图 2(a)所示。峰值拉应力的与路面板长度密切相关,随着板长增大,最大拉应力显著提高,如图 2(b)所示。因此降低单块路面板长度是降低水泥混凝土路面板

收稿日期: 2016-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(51278278)

作者简介: 张 君(1962—),男,教授,博士生导师

通信作者: 张 君, junz@tsinghua.edu.cn

开裂风险的有效措施. 此外, 混凝土路面暴露于大气环境中, 将随着环境温度变化产生温度变形, 由此引发的温度应力分布规律与收缩应力类似.

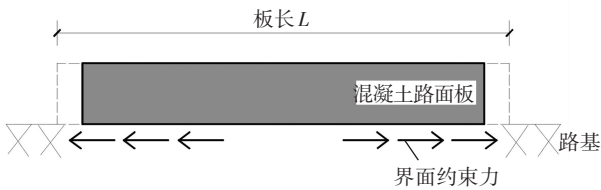


图 1 路面板模型
Fig.1 Pavement slab model

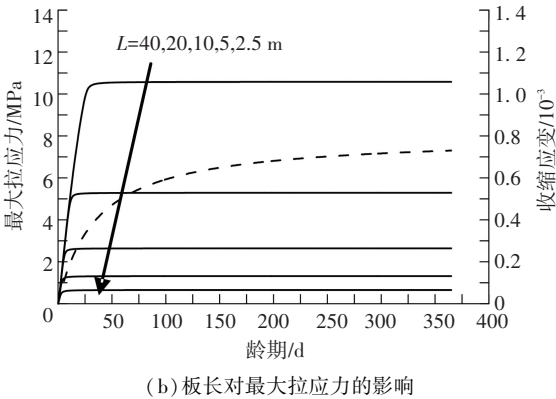
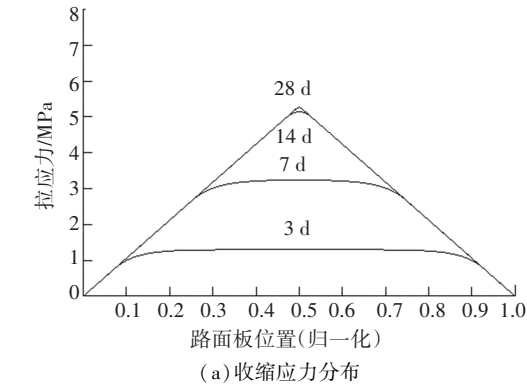


图 2 路面板收缩应力分布

Fig.2 Distribution of shrinkage stresses in pavement slab

针对上述混凝土路面内收缩与温度应力引发的混凝土开裂问题, 工程中采取的应对措施是每隔 4~6 m 设置一道横向切缝, 将连续路面分割为尺寸较小的板, 减小由收缩、温度变化等因素引起的拉应力, 从而大幅降低混凝土路面再开裂的风险. 但切缝部位往往成为水泥混凝土路面的薄弱环节, 带来路面错台、唧泥、拱起等病害^[4]. 随着切缝填料的老化和磨损, 雨水和侵蚀性介质 (如防冻盐) 易侵入切缝, 与钢筋接触进而导致钢筋锈蚀; 冬季则造成冰胀, 使切缝宽度进一步张开, 严重影响路面整体性和耐久性. 损伤的混凝土路面通常需要维修或更换, 同时也影响路面的服役质量. 可见, 路面切缝的存在增加了路面的维修维护成本, 严重影响行车舒适性, 是“咯噔”跳车现象形成的根源.

为解决水泥混凝土路面切缝引发的各类工程问题, 本文提出在混凝土路面中设置延性段, 形成无切缝混凝土路面. 首先, 这种无切缝结构可有效吸收两侧混凝土路面板的变形, 保证路面板不开裂; 其次, 延性段与两侧混凝土板连接良好, 确保变形集中发生在延性段内部而非界面处, 避免宏观可见裂纹的出现; 第三, 延性段可有效传交通荷载, 保证路面整体性. 其中, 延性段材料采用课题组研发的具有应变硬化、多缝开裂和低干燥收缩特性的高延性低干缩纤维增强水泥基复合材料 (LSECC).

1 无切缝水泥混凝土路面设计方法

1.1 工作原理

无切缝水泥混凝土路面是将传统混凝土路面中的切缝取消并代替以高延性纤维增强水泥基复合材料而形成的路面结构形式. 经过合理的材料和结构设计, 混凝土路面的收缩和温度变形可由高延性水泥基材料中形成的多条细微裂纹补偿. 单条裂纹宽度小于 100 μm , 并不会对结构耐久性不利. 同时, 延性段的设置也将提高路面结构的整体性, 从而保证路面行车舒适度.

延性段的截面示意图如图 3 所示. 其中水平锚固钢筋的设置是为了增强延性材料 LSECC-混凝土界面锚固, 确保界面不开裂; 竖直锚固钢筋的作用是提供延性材料的抗拔能力, 同时辅助定位水平锚固钢筋; 铝板的作用是在混凝土路面板中形成缺陷, 将开裂反射至延性中.

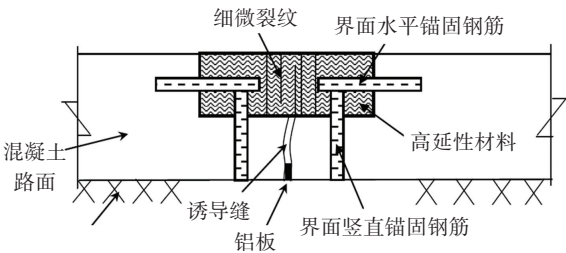


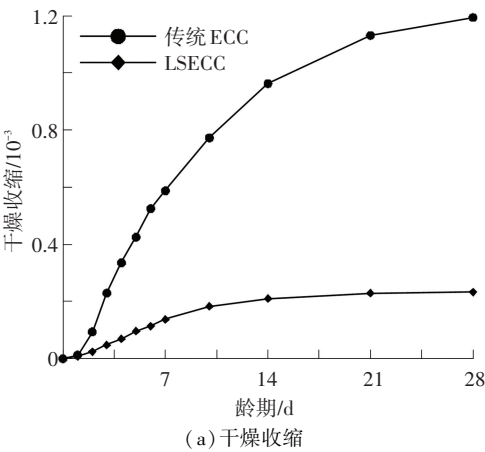
图 3 延性段截面示意

Fig.3 Schematic diagram showing the cross section of ductile strip

无切缝水泥混凝土路面技术在河北省密涿支线高速公路某收费站广场的混凝土路面工程中进行了试点应用. 广场为普通水泥混凝土路面, 路面结构为 280 mm 厚水泥混凝土面层+180 mm 厚水泥稳定碎石+180 mm 厚级配碎石. 无切缝水泥混凝土路面的施工位置为收费站广场北侧加宽车道, 长 55 m, 宽 2.88~4.5 m. 2.88 m 宽段设置 10 道延性段, 间距 4.2 m; 4.5 m 宽段设置 1 道延性段, 间距 5 m, 共计 11 道延性段. 通过对上述 11 条原有切缝的改造, 实现 55 m 长无切缝混凝土路面工程试点应用.

1.2 延性材料配合比与基本性能

普通混凝土的配合比:水泥、水、砂、石子分别为 388、167、634、1 231 kg/m³,水胶比 0.43;高延性材料 LSECC 的配合比:复合水泥、粉煤灰、石英砂、水、纤维、减水剂、缓凝剂分别为 962、240、361、421、24、6、3 kg/m³,水胶比为 0.35. 其中,普通混凝土所用水泥为北京金隅集团生产的 P·O.42.5 普通硅酸盐水泥;LSECC 所用水泥为本课题组研发的低缩复合水泥;普通混凝土所用砂为天然砂,细度模数 2.7;LSECC 所用砂为秦皇岛海港秦东石英砂厂生产的石英砂,细度 100~200 目;石子为房山 5~20 mm 碎



石;粉煤灰为 I 级低钙灰;减水剂为江苏博特新材料有限公司生产的高效聚羧酸减水剂;纤维为日本 Kuraray 公司生产的聚乙烯醇(PVA)纤维,其相关性参数:密度为 1.2 g/cm³,抗拉强度为 1 620 MPa,弹性模量为 42.8 GPa,直径为 0.039 mm,长度为 12 mm. 混凝土和高延性材料 LSECC 的 28 d 立方体抗压强度分别为 50.8、47.1MPa.

关于 LSECC 材料的干燥收缩与拉压等力学性能,本文在前期发表的文献中已有详细介绍^[5-7]. 本文将干燥收缩与单轴拉伸试验结果列于图 4.

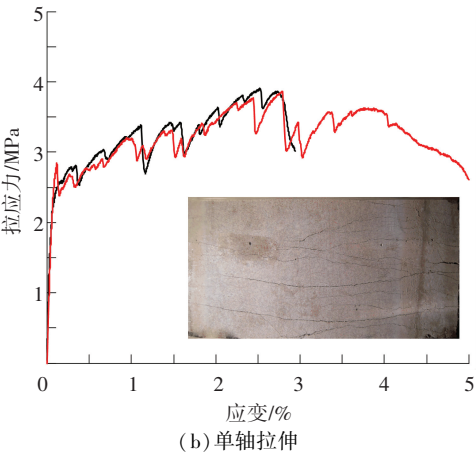


图 4 LSECC 相关性能曲线

Fig.4 Related performance of LSECC

其中为方便对比,将传统延性材料(ECC)的干燥收缩实验结果也示于图中. 试验结果表明,传统 ECC 在 28 d 龄期的干燥收缩为 $1\,200\times10^{-6}$ 左右,而 LSECC 在 28 d 龄期的干燥收缩为 200×10^{-6} 左右,约为传统 ECC 的 1/6. 同时,LSECC 材料在轴拉荷载作用下呈现多缝开裂和应变硬化特征,极限拉伸应变可达 3% 以上.

1.3 延性段长度的确定

LSECC 延性段长度的确定应考虑延性材料的变形能力、延性段间距、当地温度变化和混凝土的收缩变形等因素^[8]. 假设 LSECC 和混凝土段的长度分别为 l_1 、 l_2 ,且两种材料粘结锚固良好,界面不发生破坏. 两种材料的轴拉应力-应变曲线示意图如图 5 所示.

在单轴拉伸状态下,路面板沿长度方向的整体应变能力 ε_c 为

$$\varepsilon_c = \varepsilon_1 \left(\frac{l_1}{l} \right) + \varepsilon_2 \left(\frac{l_2}{l} \right). \tag{1}$$

式中: ε_1 为 LSECC 的极限拉伸应变, ε_2 为混凝土在相应轴拉荷载下的应变, l 为路面板长度.

LSECC 材料的实测极限拉应变可达 3%~4%, 本文将 ε_1 保守地假设为 1%~2%. 图 6 给出了 ε_1 分别为 1%、2% 时,路面板整体变形能力 ε_c 随延性

段长度 l_1 的变化规律. 可见,给定 LSECC 长度时, LSECC 的极限拉应变越大,路面板的整体变形能力越强. 同时,增加 LSECC 延性段的长度也可以提高路面板的整体变形能力.

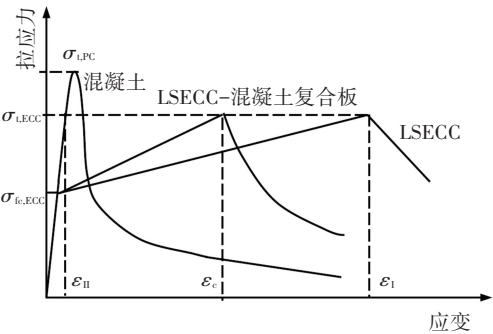


图 5 LSECC 和混凝土的轴拉应力-应变曲线示意图

Fig.5 Schematic diagram of tensile stress-strain curves of LSECC and concrete

带延性段路面板的变形需求主要由当地温度和混凝土收缩变形决定,即

$$\varepsilon_R = \alpha_T \Delta T + \varepsilon_{sh}. \tag{2}$$

式中: ε_R 为路面板整体拉应变的需求值; α_T 为混凝土的热变形系数,一般取为 0.001 %/℃; ΔT 为年温差,北京及周边地区一般为 50~60 ℃;混凝土的收缩应变 ε_{sh} 一般为 0.06 %. 将 ΔT 取为 60 ℃, ε_{sh} 取为

0.06%,并将各数值代入式(2),可计算出路面板整体变形需求 ε_R 为0.12%。

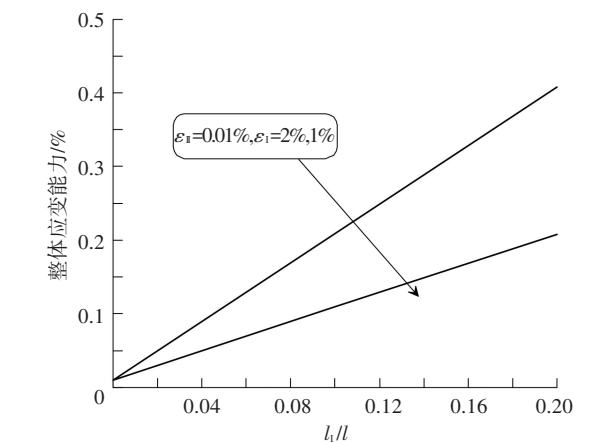


图6 路面板整体变形能力随延性段长度的变化关系

Fig.6 Overall strain capacity of LSECC-concrete composite bar as a function of LSECC strip length

根据本工程资料,路面板长度 l 有4.2、5.0 m两种。分别取4组不同的LSECC极限拉应变 ε_1 进行试算,得到对应的LSECC延性段最小长度,列于表1。本工程采用的LSECC材料极限拉应变实测值在3.0%以上,将极限拉应变 ε_1 设计值保守地取为1.5%,则4.2 m和5.0 m路面板中LSECC延性段长度应分别应大于310、369 mm。考虑一定的富余量,并且为施工方便,将4.2 m路面板延性段长度确定为400 mm,5.0 m路面板延性段长度确定为500 mm。

表1 不同 ε_1 下LSECC延性段的最小长度

Tab.1 Minimum length of LSECC strip at different ε_1

路面板长度/mm	最小长度/mm			
	$\varepsilon_1 = 1.0\%$	$\varepsilon_1 = 1.2\%$	$\varepsilon_1 = 1.5\%$	$\varepsilon_1 = 2.0\%$
4 200	467	388	310	232
5 000	556	462	369	276

1.4 钢筋锚固参数的确定

在LSECC-混凝土界面设置水平钢筋的目的是增强界面锚固,将混凝土板变形引入到LSECC延性段中形成多缝开裂,并确保LSECC-混凝土界面不开裂。计算的基本假设:1)忽略LSECC与混凝土的界面粘结;2)水平钢筋主要传递LSECC与混凝土之间的轴向力。钢筋选用公称直径为20 mm的带肋钢筋,需要确定的参数包括钢筋间距 D 和钢筋锚固长度 l_a 。钢筋的粘结强度 τ_u 参考经验公式^[9]进行估算,即

$$\tau_u = (0.82 + 0.9 \frac{d}{l_a}) \times (1.6 + 0.7 \frac{c}{d} + 20\rho_{sv}) \sigma_t$$

(3)

式中: d 为钢筋公称直径, l_a 为钢筋锚固长度, c 为钢筋保护层厚度, ρ_{sv} 为配箍率, σ_t 为混凝土抗拉强度。

为使延性材料充分发挥作用,钢筋提供的锚固力应足够使LSECC形成多缝开裂,初裂后实现应变硬化并最终达到抗拉强度 σ_t 。根据轴拉试验数据,将LSECC材料的抗拉强度 σ_t 取为4.0 MPa。单根钢筋提供的锚固力应足够使钢筋间距范围内的LSECC实现应变硬化并最终达到抗拉强度 σ_t ,表达式为

$$\pi d l_a \tau_u = h D \sigma_t$$

(4)

式中 h 为LSECC截面高度,本工程中设计为100 mm。

试取钢筋锚固长度 l_a 为120 mm,同时易得钢筋保护层厚度为40 mm,将数值代入式(3),计算出极限粘结强度 τ_u 约为11.6 MPa。则钢筋间距 D 应满足

$$D \leq \pi d l_a \tau_u / (h \sigma_t) = 219 \text{ mm}$$

(5)

考虑到安全性因素,将 $l_a = 120$ mm时的锚固间距设计为150 mm。此外,为保证LSECC和混凝土有效协同工作,须对LSECC-混凝土界面的张开宽度 w 进行验算。参照单根纤维拔出模型^[10],单根钢筋拔出的荷载-裂纹宽度($P-w$)关系表达式为

$$P(w) = \frac{\pi}{2} [(1 + \eta) E_s d_s^3 \tau_u w]^{\frac{1}{2}}$$

(6)

式中: E_s 为钢筋弹性模量,取为210 GPa; d_s 为钢筋公称直径; τ_u 为钢筋-LSECC界面粘结强度; η 为钢筋和LSECC的轴向刚度比,即

$$\eta = A_s E_s / (A_m E_m)$$

(7)

钢筋提供的最大拔出力 P_m 应能够使LSECC延性段产生轴拉破坏,表达式为

$$P_m > h D \sigma_t$$

(8)

代入式(6),可得到最大界面张开宽度 w_m 约为61 μm 。这一量级的界面张开宽度与LSECC材料多缝开裂阶段的裂纹宽度相当,并不会对结构的耐久性造成不利影响。综合以上分析,选用钢筋直径20 mm、间距150 mm及锚固长度120 mm是合理的。

代入式(6),可得到最大界面张开宽度 w_m 约为61 μm 。这一量级的界面张开宽度与LSECC材料多缝开裂阶段的裂纹宽度相当,并不会对结构的耐久性造成不利影响。综合以上分析,选用钢筋直径20 mm、间距150 mm及锚固长度120 mm是合理的。

2 无切缝水泥混凝土路面施工过程

2.1 模具设计

为固定钢筋位置、浇筑设计要求的LSECC后浇带,同时考虑拆模方便,设计了如图7所示的模具。设计的模具主要包括钢模板、伸缩杆和钢筋支架3个部分。

模板采用钢模板,锚固钢筋卡槽的深度为50 mm,即LSECC厚度的一半,宽度为20 mm,即钢筋的公称直径;卡槽间距为150 mm。设置伸缩拉杆的目的是方便拆模,同时可灵活调整预留槽宽度,提高模具的适用性。水平锚固钢筋与竖直锚固钢筋焊接在一起,并将竖筋连接到底部的方形钢架上,使所有锚固钢筋形成相对独立的整体框架。模板的固定方式根据现场情况可选择通过螺栓固定于两侧槽钢

(路面板侧模)或通过辅助搭件搭接固定于两侧已硬化的混凝土路面板上。

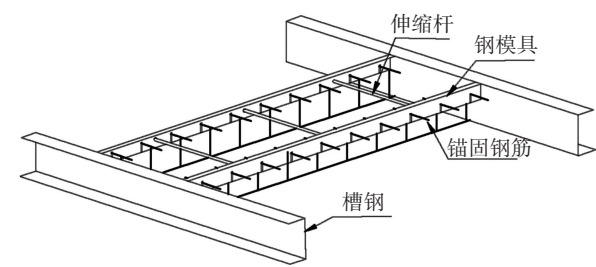


图 7 延性段预留槽施工模具

Fig.7 Mould of preformed groove for ductile strip

2.2 模具安装

模具安装过程:1) L 型铝板固定. 铝板用于预留诱导缝,将初始裂纹反射入 LSECC 延性段. 固定铝板前应铺设毛毡,防止水分下渗形成积泥. 铝板通过钢钉固定于地基,并沿延性段中线布置. 铝板顶端高出地基平面约 40 mm,其上方按照原有设计布设传力杆. 2) 模板安装. 水平钢筋采用公称直径 20 mm 的带肋钢筋,长度 24 cm,横向间距 15 cm. 水平锚固钢筋与竖直锚固钢筋焊接固定,并将竖筋焊接于底部的方形钢筋架上,使所有锚固筋形成相对独立的整体. 浇筑混凝土前将模板搭接固定在两侧已硬化的混凝土上,然后调整伸缩拉杆的长度,使模板宽度达到设计尺寸(400 mm 或 500 mm). 水平钢筋穿过侧模槽口,伸出长度 12 cm,保持牢固、水平.

2.3 混凝土浇筑

混凝土浇筑步骤:1) 洒水. 保证摊铺混凝土前基层湿润,而且尽可能洒布均匀,尤其在基层不平整之处禁止存水. 2) 摊铺和振捣. 混凝土的摊铺、振捣、整平、抹面连续施工,如需中断应设施工缝. 三辊轴应垂直路面中线沿纵向拖行,往返 2~3 遍,使表面泛浆均匀平整. 混凝土拌合物布料长度大于 10 m 时,开始振捣作业. 3) 表面修整和防滑措施. 在混凝土终凝前必须用人工或机械将其表面抹平. 抹面完成后应进行清边整缝,清除粘浆,修补缺边、掉角. 已终凝的路面上,用锯槽机将路面锯成宽 2~3 mm,间距 20 mm 的小横槽. 4) 养护. 混凝土路面板做完面应应及时养护,使混凝土拌合料有良好的水化、水解强度发育条件,并防止产生收缩裂缝,养护时间为 7 d.

2.4 模具拆除与 LSECC 浇注

混凝土浇筑 24 h 后拆除模具. 旋松伸缩杆,使模具与混凝土脱离,然后向上提起模板即拆除模具. 模具拆除过程中应避免对硬化混凝土造成损伤. 普通混凝土养护 7 d 后可浇筑 LSECC. 拆模后的延性段预留槽如图 8 (a) 所示. 在浇筑之前,应清理

LSECC 后浇槽. 清理完成后在普通混凝土和 LSECC 的水平界面设置滑移带,滑移带应在延性段截面中间 5 cm 宽度范围内. 滑移带之外的界面应进行泼水湿润,以增强界面粘结.

施工步骤:1) 搅拌. 入料时,先倒入所有粉料及砂子,搅拌 1 min 混合均匀,然后加入自来水、外加剂,搅拌 2~3 min 使浆体获得较好的流动性. 均匀撒入纤维,搅拌 3~5 min 使纤维分散均匀. 2) 浇筑成型. 新拌浆体运输至作业面,浇筑入预留槽,边插捣边抹平,无需振捣. LSECC 延性段的抹面、养护等施工工艺与混凝土路面板类似. LSECC 延性段经养护后揭膜,最终完成如图 8 (b) 所示的无切缝混凝土路面.

由于 LSECC 和易性良好,简单的抹面作业即可有效保证施工缝平整度,同时,LSECC 延性段与混凝土板通过界面锚固形成连续的整体,在路面服役过程中不会产生类似切缝构造的错台病害,因此无缝路面的平整度、行车舒适度要优于传统带切缝的路面结构. 由图 8 (b) 也可以看到,宏观上很难区分延性段与普通混凝土板,路面连续、整体性良好.



(a) 延性段预留槽



(b) 工程整体照片

图 8 无切缝水泥混凝土路面

Fig.8 Jointless concrete pavement

3 无切缝水泥混凝土路面服役状况

本研究实施的无切缝水泥混凝土路面服役状况照片如图9所示. 照片拍摄时无缝路面工程已服役3 a左右. 在混凝土收缩、温度变形及机械荷载的共同作用下,LSECC 延性段中形成了细微的裂纹. 由于单条裂纹宽度很小,在宏观照片中很难看到裂缝的存在,只有在细观照片中才能够观察到细微的裂纹. 同时,LSECC-混凝土界面粘结完好,并无脱粘破坏现象产生. 可见,无切缝混凝土路面服役状况良好,界面锚固设计能够将路面板变形完全引入LSECC 延性段,形成宏观上不可见的细微裂纹. 由此验证了无切缝混凝土路面设计理念,表明了无切缝路面的建造是成功的.

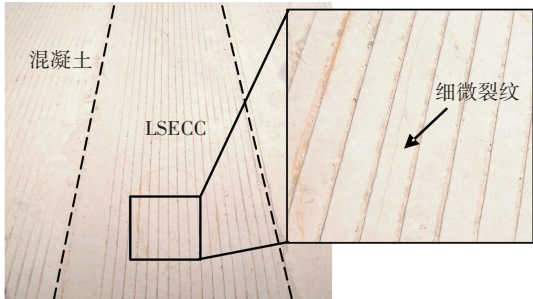


图9 无切缝水泥混凝土路面服役状况照片

Fig.9 Service condition of jointless concrete pavement

4 结 论

1)采用 LSECC 延性段取代传统混凝土路面切缝,形成无切缝水泥混凝土路面. LSECC 在轴拉状态下具有应变硬化和多缝开裂特征,可有效补偿普通混凝土路面板变形,同时延性段中单条裂纹宽度均小于 100 μm,提高了整体路面系统的耐久性.

2)针对试点工程,应用讨论了无缝路面的设计方法. 无缝路面的设计内容主要包括材料配合比、LSECC 延性段长度、钢筋锚固参数. 通过材料配比设计,实现了 LSECC 与混凝土的强度差异,确保 LSECC 先于混凝土开裂. 通过延性段长度和钢筋锚固参数的确定,确保延性段能够完全吸收整体路面板变形,同时有效防止界面破坏,使变形集中发生在延性段中.

3)实施了无切缝混凝土路面试点工程应用,通过模具设计和安装、混凝土浇筑、模具拆除与LSECC浇

筑实现了无缝路面建造. 施工过程简便可行,为无切缝混凝土路面推广应用提供了基础.

参考文献

[1] 郑木莲,王秉纲,陈拴发. 推进水泥混凝土路面在中国的发展[J]. 公路交通科技, 2007 (4): 5-12.
ZHENG Mulian, WANG Binggang, CHEN Shuanfa. Advance in development of cement concrete pavement in China [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2007 (4): 5-12.

[2] 邓学钧,陈荣生. 刚性路面设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
DENG Xuejun, CHEN Rongsheng. Rigid pavement design [M]. Beijing: China Communications Press, 1990.

[3] ZHANG Jun, LENG Bing. Analysis of shrinkage-induced stresses in concrete pavements[J]. Magazine of Concrete Research, 2004, 56 (10): 585-595. DOI: 10.1680/mac.56.10.585.53680.

[4] 李世华,张建辉. 道路桥梁养护手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
LI Shihua, ZHANG Jianhui. Road and bridge maintenance manual [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2002.

[5] ZHANG Jun, GONG Chengxu, GUO Zili, et al. Mechanical performance of low shrinkage engineered cementitious composite in tension and compression[J]. Journal of Composite Materials, 2009, 43 (22): 2571-2585. DOI: 10.1177/0021998309345303.

[6] ZHANG Jun, GONG Chengxu, GUO Zili, et al. Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(4): 303-312. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.11.012.

[7] 公成旭,张君. 高韧性纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 361-366. DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2008.03.015.
GONG Chengxu, ZHANG Jun. Tensile performance of high ductile fiber reinforced cementitious composite[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39 (3): 361-366. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2008.03.015.

[8] ZHANG Jun, WANG Zhenbo, JU Xianchun. Application of ductile fiber reinforced cementitious composite in jointless concrete pavements[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 50: 224-231. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.02.007.

[9] 徐有邻,邵卓民,沈文都. 钢筋与混凝土的粘结锚固强度[J]. 建筑科学, 1988 (4): 8-14. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.1988.04.002.
XU Youlin, SHAO Zhuomin, SHEN Wendu. Bond strength between reinforced bars and concrete[J]. Building Science, 1988 (4): 8-14. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.1988.04.002.

[10] LI V C. Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete[J]. Materials and Structures, 1993, 26: 486-494. DOI: 10.1007/BF02472808.

(编辑 魏希柱)