

文章编号: 0451-0712(2006)12-0087-05

中图分类号: U416.216

文献标识码: B

PCC-PMCC 复合式路面的 结构设计与经济性分析

贾 玉¹, 申爱琴¹, 祁秀林²

(1. 长安大学公路学院 西安市 710064; 2. 惠州市公路局 惠州市 516001)

摘 要: 根据聚合物改性水泥混凝土(PMCC)的实测力学参数和试验路铺筑使用情况, 讨论了PCC-PMCC 复合式路面这种新型路面结构的经济性, 并提出了面层厚度设计方法。结果表明: PCC-PMCC 复合式路面可承受的累计轴载作用次数比普通水泥混凝土路面提高了55%以上, 性价比增大幅度可以达到12%以上; 结合式PCC-PMCC 复合式路面面层总厚度应按照下面层PCC的模量和弯拉强度拟定, 上下面层厚度的比值可按照上下面层模量反比、聚合物掺量和经济性确定。

关键词: 聚合物改性水泥混凝土; 复合式路面; 疲劳应力; 累计轴载作用次数; 结构设计; 经济性

聚合物改性水泥混凝土(Polymer Modified Concrete Cement, 缩写为PMCC)复合式路面是一种新型的路面结构形式, 它在上层采用PMCC, 下面层可以采用普通水泥混凝土(PCC)或经济混凝土(EPCC)。PMCC具有弯拉强度高、路面表面功能优越、抗冲击、耐疲劳等一系列优点, 适用于重交通、自然环境恶劣、对路面表面功能要求高的路段, 同时还可以提高行车舒适性、改善行车环境等。为了充分发挥PMCC的优势, 进一步改善水泥混凝土路面的路用性能, 对PMCC进行了系统研究, 并首次在国内铺筑了PCC-PMCC复合式路面试验路。结合相关研究及试验路使用情况, 本文通过对PCC-PMCC复合式路面的疲劳应力进行计算分析, 讨论了不同面层厚度组合的性价比, 并根据水泥混凝土板的受力情况提出了结构层厚度的设计方法。

1 材料参数确定

为了确定PMCC的材料参数, 研究中针对不同聚合物掺量的PMCC进行了力学试验, 根据试验结果, 本文选用的材料参数见表1。其中, 面层厚度的取值范围由试验路实际厚度扩展得到。由于集料粒径的影响, 上面层PMCC板的厚度不宜太小, 因此上面层的厚度范围取为6~12 cm。下面层PCC板的厚度根据面层总厚度为25 cm进行选取。

表1 各结构层材料参数的取值范围

结构层	材料	弹性模量/MPa	泊松比	厚度范围/cm
上面层	PMCC	27×10^3	0.15	6~12
下面层	PCC	31×10^3	0.15	19~13
基层及路基	根据土质状况选取	187	0.30	—

2 疲劳应力计算分析

疲劳应力是判断路面强度破坏的主要指标之一, 可通过对比分析PCC-PMCC复合式路面与PCC路面结构的疲劳应力, 判定PCC-PMCC复合式路面这种新型路面结构的承载能力是否更加优良。为了比较PCC-PMCC复合式路面与PCC路面的疲劳应力, PCC路面结构采用本课题所在道路的面层结构形式, 即25 cm厚的PCC单层板。考虑到PCC-PMCC复合式路面在试验路面层间结合方式的检测结果为结合式, 在此主要讨论结合式PCC-PMCC复合式路面的疲劳应力。

根据PCC路面结构的面层厚度(25 cm), 在荷载应力和温度应力分析采用的厚度组合中, 选取面层总厚度为25 cm的结合式PCC-PMCC复合式路面厚度组合(所选的结构组合见表2), 分别计算理想状况和考虑摩阻作用(摩阻系数取为1.5)两种情况下, PCC-PMCC复合式路面下面层PCC板受到的综

合疲劳应力,结果见表 2 和图 1。

表 2 PCC-PMCC 复合式路面与 PCC 路面结构的疲劳应力

面层组合方式		1	2	3	4	5
面层厚度	PMCC	0	6	8	10	12
cm	PCC	25	19	17	15	13
疲劳应力	理想条件	4.943	4.868	4.871	4.854	4.873
	考虑摩阻作用	4.637	4.535	4.537	4.548	4.540

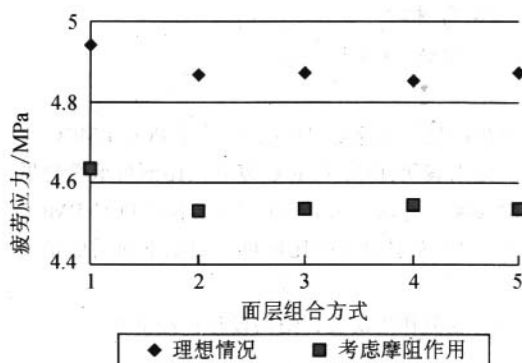


图 1 不同结构组合的疲劳应力

分析表 2 和图 1 可见,PCC-PMCC 复合式路面下面层 PCC 板受到的疲劳应力与面层厚度组合有关,在一定应力值附近波动,但总小于 PCC 路面的疲劳应力。对于试验路两种结构形式即表 2 中面层组合方式 3 和 5,在理想条件下疲劳应力分别比基准情况减小 1.5% 和 1.4%,在摩阻作用下分别减小 2.2% 和 2.1%。这表明 PCC-PMCC 复合式路面抗疲劳作用的能力有所增强。

3 经济性分析

3.1 累计轴载作用次数的反算

采用考虑摩阻作用后的疲劳应力模拟实际情况,则当 PCC-PMCC 复合式路面达到单层式 PCC 路面的疲劳应力时,即 PCC 下面层的疲劳应力为 4.637 MPa 时,对所承受的累计轴载进行反算。反算公式及各参数的取值根据《公路水泥混凝土路面设计规范》(JTG D40—2002)选取,其中设计基准期内的荷载疲劳应力系数计算公式如下:

$$k_f = N_e^{-v} \quad (1)$$

式中: k_f 为设计基准期内的荷载疲劳应力系数; N_e 为设计基准期内标准轴载累计作用次数; v 为与混合料性质有关的指数,对于普通水泥混凝土、钢筋混凝土、连续配筋混凝土, $v=0.057$ 。

所以:

$$N_e = k_f^{1/v} = k_f^{17.54} \quad (2)$$

采用式(2)对累计轴载作用次数的反算结果见表 3。

表 3 PCC-PMCC 复合式路面与 PCC 路面的累计轴载作用次数反算结果

面层组合方式		1	2	3	4	5
面层厚度/cm	PMCC	0	6	8	10	12
	PCC	25	19	17	15	13
累计轴载作用次数/($\times 10^7$ 次)		1.43	2.39	2.35	2.22	2.31
比 PCC 路面提高的百分率/%		—	67.1	64.3	55.2	61.5

分析表 3 可见,当达到相同的疲劳应力时,PCC-PMCC 复合式路面可承受的累计轴载作用次数比 PCC 路面有较大幅度的提高。在表 3 的 4 种复合式路面厚度组合中,最小提高幅度为 55.2%,最大提高幅度为 67.1%。累计轴载作用次数随着结构组合的变化规律见图 2。

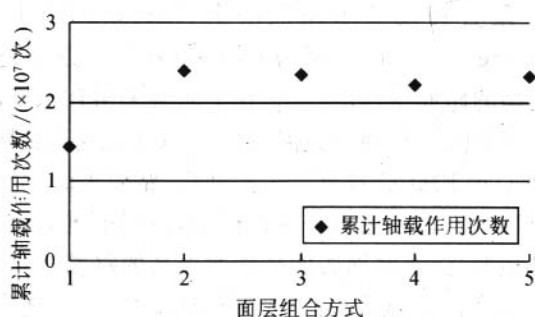


图 2 不同结构组合的累计轴载作用次数

由图 2 可以看出,在 PCC 路面中用 PMCC 作为上面层,路面板可承受的累计轴载作用次数迅速增长,面层组合 2 达到累计轴载作用次数的最大值。但随着上面层 PMCC 厚度的不断增加,由于温度疲劳应力和荷载疲劳应力具有不同的变化规律,累计轴载作用次数在面层组合 4 降到最低点。但随着上面层厚度的进一步增大,路面板可承受的累计轴载作用次数又开始增加。

3.2 经济性比较

由于 PMCC 的造价较高,达到 PCC 的 6 倍以上,所以有必要对 PCC-PMCC 复合式路面的性价比进行分析,并选用累计轴载作用次数与费用的比值作为性价比的依据。由于 PCC-PMCC 复合式路面和 PCC 路面均需要日常养护,而 PCC 路面一般 5~10 年就需要大修,大修费用往往高于新建路面费用,对经济性影响较大,应加以考虑,所以费用按

照每公里水泥混凝土路面面层的造价和大中修费用进行计算。费用计算采用的路幅宽度为 $2 \times 7.5 \text{ m}$, PCC 的造价为 218.51 元/m^3 , PMCC 的造价为 $1\,389.448 \text{ 元/m}^3$ 。PCC 路面在第 10、20 年进行大修或中修,维修费用取为 PCC 的造价,贴现率按国家有关部委建议取为 10%,具体计算结果见表 4。

表 4 PCC-PMCC 复合式路面与 PCC 路面的性价比

面层组合方式		1	2	3	4	5
面层厚度/cm	PMCC	0	6	8	10	12
	PCC	25	19	17	15	13
每公里费用/万元		125.719	187.326	222.454	257.582	292.710
性价比/(次/元)		11.37	12.76	10.56	8.62	7.89
比 PCC 路面提高的百分率/%		—	12.2	-7.1	-24.2	-30.6

由表 4 可见,随着 PMCC 上面层厚度的增加,PCC-PMCC 复合式路面的性价比逐渐降低。这是因为 PMCC 的造价较高,随着上面层 PMCC 厚度的增加,费用的增长速度超过了累计轴载作用次数增长的速度。而且,累计轴载作用次数的变化是随着上面层厚度的增加先增大后减小再增大,如图 2 所示,这就造成了上面层厚度较大时 PCC-PMCC 复合式路面的性价比反而降低的现象。同时可以看出,当上面层 PMCC 的厚度达到或超过 8 cm 时,PCC-PMCC 复合式路面的性价比低于 PCC 单层式路面。在分析的面层厚度组合中,面层组合方式 2 具有最优的性价比,比 PCC 路面提高了 12.2%。

在计算性价比时,由于缺少后期费用资料,主要考虑了 PCC-PMCC 复合式路面的初期费用和大中修费用。实际上,由于 PMCC 具有优越的路面表面功能和抗冲击性能,PCC-PMCC 复合式路面可以大大减少行车冲击对路面板的破坏,降低养护费用,也使货损等用户费用降低,同时可以提高行车舒适性。所以,PCC-PMCC 复合式路面具有很大的社会效益和经济效益。

4 结构组合设计

4.1 层间结合方式的确定

采用 15% 的聚合物掺加量铺筑了 PCC-PMCC 复合式路面试验路,对试验路的检测表明,PMCC 上面层和 PCC 下面层之间接触方式为结合式。由于 PMCC 与 PCC 之间的粘结弯拉强度反映了 PCC-PMCC 复合式路面面层之间的粘结强度变化关系,为了进一步分析面层之间的粘结性能,对不同聚合

物掺量的 PMCC 与 PCC 之间的粘结弯拉强度进行了试验,试验结果见表 5。

表 5 PMCC 与 PCC 粘结弯拉强度

聚合物掺量/%	0	5	10	15
粘结弯拉强度/MPa	1.72	1.55	2.26	2.95

分析表 5 可见,当掺加聚合物以后,粘结弯拉强度随着聚合物掺加量的增加逐渐增大,虽然聚合物掺量为 5% 时粘结弯拉强度下降了 9.9%,但是当聚合物掺量达到 10% 时,粘结弯拉强度较普通水泥混凝土的粘结弯拉强度提高了 31.4%,而当聚合物掺量达到 15% 时粘结强度较普通水泥混凝土提高了 71.5%。而且,PMCC 与 PCC 的粘结弯拉强度与聚合物掺加量有很好的线性相关性,采用线性插值计算,当聚合物掺量为 6.2% 时,PMCC 的粘结弯拉强度与 PCC 相当。

4.2 面层厚度的设计

面层厚度的确定包括两部分:上下面层厚度的比例和总厚度的确定。其中上下面层厚度的比例可以根据层间受力状况确定,总厚度应根据下面层受力情况确定。

4.2.1 面层厚度比例的确定

对于结合式 PCC-PMCC 复合式路面,在层间剪切应力的反复作用下,有可能沿上下面层的结合面开裂,逐渐趋于分离式复合路面。由于分离式复合路面和结合式复合路面的受力模式不同,层间分离后下面层 PCC 板受到的荷载应力将提高 30% 以上,所以结合式复合路面的设计应能够防止层间分离现象的发生,即应使得层间结合强度在设计使用期内不低于层间剪切应力及其引起的疲劳应力。层间剪切应力由两部分组成,即荷载作用引起的层间剪切应力和温度作用引起的层间剪切应力。

对比分析发现,在两种不同作用下产生的层间剪切应力具有大致相同的变化规律。随着上面层厚度和模量的增加,层间剪切应力减小;而随着下面层厚度和模量的增加,层间剪切应力增大。计算结果见表 6,其中上面层模量为 27 GPa,下面层模量为 31 GPa。

表 6 不同厚度组合时的层间剪应力

厚度组合/cm	上面层	6	8	10	12	13	14
	下面层	19	17	15	13	12	11
层间剪应力/MPa	荷载	0.110	0.079	0.048	0.019	0.009	0.017
	温度	0.178	0.124	0.073	0.023	0.005	0.020

由表 6 可见,随着上下面层厚度比值的变化,层间剪切应力先减小后增大,有最小值出现,且最小值出现在上面层厚度为 13~14 cm、下面层厚度为 12~11 cm 的范围内。按照层间剪切应力的变化趋势,采用面层厚度与面层模量成反比设计面层厚度时层间剪切应力最小,而且计算方便,因此使得结合式 PCC-PMCC 复合式路面层间剪切应力最小的面层厚度的比例可以按照模量的反比例确定。

由于本课题中上面层采用 PMCC,造价比 PCC 有较大幅度的提高而模量有所降低,按照层间剪切应力最小的原则会导致上面层厚度计算结果较大,从而提高了路面造价。实际上,当聚合物掺量大于 6.2% 时,如表 5 所示,PMCC 的层间粘结性能优于 PCC。取上下面层厚度为 8 cm 和 17 cm,计算得到荷载和温度引起的层间剪应力分别为 0.079 MPa 和 0.124 MPa,远小于粘结弯拉强度 2.95 MPa,即使考虑剪应力的疲劳特性,该应力也不至于引起层间破坏。而且,由于接缝具有一定的传荷能力,实际中荷载作用引起的层间剪应力比临界荷位时的计算值有所减小。参考目前大多数国家水泥混凝土复合式路面面层厚度的确定方法,结合式 PCC-PMCC 复合式路面上下面层厚度的比值应按照聚合物的掺加量确定:当聚合物掺加量达到 10% 时,上下面层厚度的比值可取为下面层模量与上面层模量比值的 0.5 倍左右,并随着掺加量的提高减小上面层厚度所占比值,但上面层厚度不宜小于按照水泥混凝土所用集料粒径确定的最小结构层厚度;当聚合物的掺量减小时,应逐渐增加上面层厚度所占比值直至达到下面层模量与上面层模量的比值。按照线性插值计算,当聚合物掺加量低于 6.2% 时,层间粘结性能还不如普通水泥混凝土,上下面层厚度比值应取为下面层模量与上面层模量的比值,如图 3 所示。

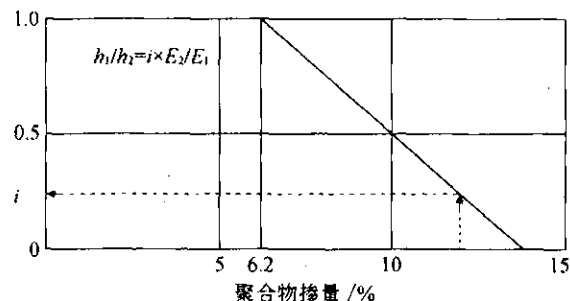


图3 面层厚度比值与聚合物掺量的关系

4.2.2 面层总厚度的确定

当总厚度相同但上下面层厚度组合不同时,计算下面层的综合疲劳应力,结果见表7。其中:上面层采用 PMCC,模量为 27 GPa;下面层采用 PCC,模量为 31 GPa。

表7 不同厚度组合时的综合疲劳应力

面层总厚度/cm		25					
面层组合方式		1*	2	3	4	5	6*
面层厚度 cm	PMCC	0	6	8	10	12	25
	PCC	25	19	17	15	13	0
综合疲劳应力 MPa	理想条件	4.943	4.868	4.871	4.854	4.873	4.459
	摩阻作用条件	4.637	4.535	4.537	4.548	4.540	4.165

注:表7中加“*”者为单层式面层。

由表7可知,结合式 PCC-PMCC 复合式路面在上下面层总厚度相同时的不同厚度组合下,随着 PMCC 上面层厚度的增加,PCC 下面层的综合疲劳应力变化幅度很小。例如在理想条件下,面层组合方式 2~5 的 4 种 PCC-PMCC 复合式路面下面层 PCC 板的综合疲劳应力的差值很小,考虑层间摩阻作用后综合疲劳应力的差值也不大。与单层式水泥混凝土路面相比,结合式 PCC-PMCC 复合式路面下面层的综合疲劳应力与 PMCC 路面差值远大过与 PCC 路面的差值,因此在选取面层总厚度时可按照 PCC 路面进行分析计算。

5 结语

(1)结合式 PCC-PMCC 复合式路面下面层的综合疲劳应力比 PCC 路面降低了 2% 左右,表明结合式 PCC-PMCC 复合式路面具有较强的抗疲劳能力。

(2)以 PCC 路面的疲劳应力作为标准,对不同厚度组合的结合式 PCC-PMCC 复合式路面进行累计轴载作用次数的反算,结果表明 PCC-PMCC 复合式路面可承受的累计轴载作用次数比 PCC 路面提高了 55% 以上,而且累计轴载作用次数随着上面层厚度的增加呈波浪形升高。

(3)按照累计轴载作用次数与造价的比值进行性价比分析表明,随着 PMCC 上面层厚度的增加,性价比先增大后降低,提高幅度可以达到 12.2% 以上。考虑 PMCC 的路面表面功能后,PCC-PMCC 复合式路面具有更高的社会效益和经济效益。

(4)新建结合式 PCC-PMCC 复合式路面面层总厚度按照下面层 PCC 的模量和弯拉强度拟定,上下

面层厚度的比值按照上下面层模量反比、聚合物掺量并结合经济性综合确定。

参考文献：

[1] 申爱琴,等. 新型混凝土路面材料及施工工艺研究(分报告三,聚合物改性水泥混凝土复合式路面结构分析与设计)[R]. 西安:长安大学,2005.

[2] 申爱琴,等. 新型混凝土路面材料及施工工艺研究(分报告一,聚合物改性水泥混凝土路面性能及复合式路面施工工艺研究)[R]. 西安:长安大学,2005.

[3] JTG D40—2002,公路水泥混凝土路面设计规范[S].

[4] Ryell J, Corkill J T. Long-term performance of an

experimental composite pavement [Z]. Highway Research Record,1973.

[5] 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.

[6] 王秉纲,戴经良,胡长顺. 复合式水泥混凝土路面设计理论与方法研究[J]. 中国公路学报,1992,(2).

[7] Khazanovich L, Ioannides A M. Structure analysis of unbonded concrete overlays under wheel and environmental loads[Z]. TRR,1995.

[8] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计理论和方法[M]. 北京:人民交通出版社,2003.

Structural Design and Economic Analysis of
PCC- PMCC Composite Pavement

JIA Yu¹, SHEN Ai-qin¹, QI Xiu-lin²

(1. Highway College, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Highway Department of Huizhou City, Huizhou 516001, China)

Abstract: According to the mechanics parameters, constructing and using of Polymer Modified Cement Concrete(PMCC), the economy of PCC(Portland Cement Concrete)- PMCC composite pavement which is a new type pavement structure is discussed in this paper. Moreover, the design method of pavement thickness is presented. The results show that the effect numbers of cumulative axle loading borne by PCC-PMCC composite pavement have improved 55% than common concrete pavement and the performance-price ratio elevates above 12%. In addition, the total thickness of combination PCC-PMCC composite pavement should be studied out by the module and flexure strength of lower pavement concrete, and then the thickness ratio of upper and lower pavement can be decided by the inverse ratio of upper and lower pavement module, polymer content and economy.

Key words: polymer modified cement concrete; composite pavement; fatigue stress; effect numbers of cumulative axle loading; structural design; economy

西藏成功铺筑露石水泥混凝土路面

“露石水泥混凝土路面高原地区应用适应性研究”课题成果鉴定会在西藏拉萨举行,专家学者在实地检测了该项技术运用在“两桥一隧”的效果和路面各项性能指标后,一致认为该课题研究成果具有实用价值和指导意义,证明了露石水泥混凝土路面在高原地区公路路面上的应用是可行的。

该课题针对青藏高原地区特殊气候、地理条件,系统研究了露石水泥混凝土路面的原材料、配合比与施工工艺,进行了抗冻试验分析、油污染试验分析。研究表明:在高原地区露石水泥混凝土路面比普通水泥混凝土路面具有更优越的抗滑、降噪音性能,且经济合理,应用前景良好。