

文章编号:1671-8879(2007)04-0028-05

## 混凝土桥面复合式铺装层受力分析和设计

徐勤武<sup>1,2</sup>, 胡长顺<sup>1</sup>, 王 虎<sup>3</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 奥斯汀交通建设集团, 美国 德克萨斯 70783;  
3. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**选取典型的 T 梁和箱梁桥型, 将桥梁体、水泥混凝土铺装层、防水层、沥青混凝土铺装层视为一个整体, 研究了复合式桥面铺装层在承受汽超-20 偏载作用下的结构响应。采用有限元方法进行三维空间实体建模, 分析了铺装层受力最不利位置、铺装层拉应力、层间剪应力和层间法向拉应力。结果表明:桥梁体、水泥混凝土铺装层、防水层和沥青混凝土铺装层相互作用, 在桥梁结构特殊部位产生铺装层最大拉应力, 在轮载作用域产生最大层间应力; 铺装层厚度对荷载应力大小有重要影响。提出了复合式铺装的设计指标, 建议沥青混凝土铺装层和水泥混凝土铺装层厚度的设计采用复合式结构。

**关键词:**道路工程; 铺装厚度; 防水层; 拉应力; 层间剪应力; 层间法向拉应力

**中图分类号:**U443.33 **文献标志码:**A

## Mechanic analysis and design of composite type overlay on concrete bridge pavement

XU Qin-wu<sup>1,2</sup>, HU Chang-shun<sup>1</sup>, WANG Hu<sup>3</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. The Transtec Group Inc Austin, Texas 70783, USA; 3. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** This paper analyzed the structure response of composite type overlay on typical T-Beam and Box-Beam bridges under traffic loading when the bridge structure, Asphalt Concrete (AC) overlay, Portland Cement Concrete (PCC) overlay, and waterproof interlay were considered as a continuous system. The 3D finite element method was used to study the critical stress position, the overlay tensile stress, interface shear stress and interface normal tensile stress. The results indicate that the bridge, PCC overlay, waterproof interlay, and AC overlay affect each other significantly, and the maximum overlay tensile stress appears at the critical position of bridges, the maximum interface stress raises at the tire loading area, and the overlay thickness has important influence on the stress magnitude. The design criteria for the composite type overlay on concrete bridges were proposed, and reasonable thickness components of AC and PCC overlay was suggested. 6 tabs, 12 figs, 12 refs.

**Key words:** road engineering; overlay thickness; waterproof interlay; tensile stress; interface shear stress; interface normal tensile stress

收稿日期:2006-10-25

基金项目:国家西部交通建设科技项目(Z03-01017)

作者简介:徐勤武(1978-),男,湖南岳阳人,美国奥斯汀交通建设集团博士,E-mail:qinwu\_xu@yahoo.com。

0 引 言

桥面铺装是一种特殊的路面结构,起着保护行车道板、防止雨水侵蚀、分散集中荷载且和桥梁主体一起承受弯矩和抵抗变形的作用。实际工程中常用的铺装形式有水泥铺装、沥青铺装和复合式铺装(上铺沥青混凝土与下铺水泥混凝土的组合)。沥青混凝土铺装的损坏常表现为层间剪切破坏和铺装层脱空起皮。文献[1]按照路面设计的方法,用简化模型对混凝土桥梁沥青铺装层间剪应力进行了计算。文献[2]应用梁体结构的线弹性理论与叠加原理,提出了车辆荷载弯矩在水泥混凝土桥梁桥面铺装层及防水层内所产生的弯曲应力计算公式,并编制了相关的计算程序。文献[3]对钢桥沥青铺装采用有限元方法,分析了铺装层拉应力和层间剪应力,并提出对应单轮荷载和双轮荷载的设计指标;水泥铺装破坏则常表现为桥梁特殊部位铺装层因拉应力过大或疲劳作用下导致的断裂和层间脱空等。文献[4]用平面解析法,按照线弹性理论对水泥铺装拉应力进行了系统分析。文献[5]采用有限元方法针对桥梁的不同形式,分析比较了混凝土桥梁水泥铺装的受力特征,并提出铺装层拉应力和层间剪应力及法向拉应力的设计指标;而复合式铺面一般采用下铺水泥混凝土和上铺沥青混凝土的组合结构。文献[6]对复合式路面结构受力、设计和施工进行了全面系统的研究,但桥面铺装结构和路面结构由于下承结构型式不一样,其受力特性、设计指标和复合式路面相差很大,故不能套用复合式路面设计方法。本文结合桥梁结构和路面分析方法,将桥梁体、防水层和铺装层视作一个相互作用的统一体,对混凝土桥梁复合式铺装结构在行车荷载作用下的受力特征及规律进行分析,提出复合式桥面铺装的设计指标和设计要点。

1 基本假设

- (1)材料线弹性。
- (2)桥梁梁体和铺装层处于无裂缝工作状态。
- (3)铺装层、桥面板和防水层间完全连续接触。
- (4)防水层、铺装层和桥梁作为整体一起承受汽车荷载的作用。

2 有限元分析模型及基本参数

选取典型的 T 形梁桥和箱形梁桥,用有限元程序 ANSYS 5.7 空间实体建模,梁体、铺装层及附属

物采用空间 8 节点实体单元模拟,防水层采用薄膜单元模拟(有平面内刚度但无平面外弯曲刚度的三维薄膜)。通过敏感性分析论证,网格密度最密处在重轮作用域划分至 2 cm×2 cm×2 cm,其他远离分析区域划分至 40 cm 不等,能满足精度要求。铺装层和桥面板间完全连续接触采用耦合处理(上下对应节点各自由度位移一致)。计算表明,简支梁相对同截面尺寸的连续梁而言,铺装层和防水层所受拉应力以及层间剪应力都较大,所以模型边界条件确定为橡胶支座支撑下的简支一跨。模型单元数 40 123,节点数 54 635(T 梁主体加 8 cm 厚铺装层)。材料参数见表 1,模型见图 1、图 2,模型结构参数见表 2。

表 1 材料基本参数

桥梁体 杨氏模量/ MPa	水泥铺装 杨氏模量/ MPa	水泥混凝土 泊松比	防水层 杨氏模量/ MPa	防水层 泊松比	防水层 厚度/ mm	沥青混凝土 杨氏模量/ MPa	沥青混凝土 泊松比
30 000	33 000	0.166 67	150	0.3	2	1 800	0.25

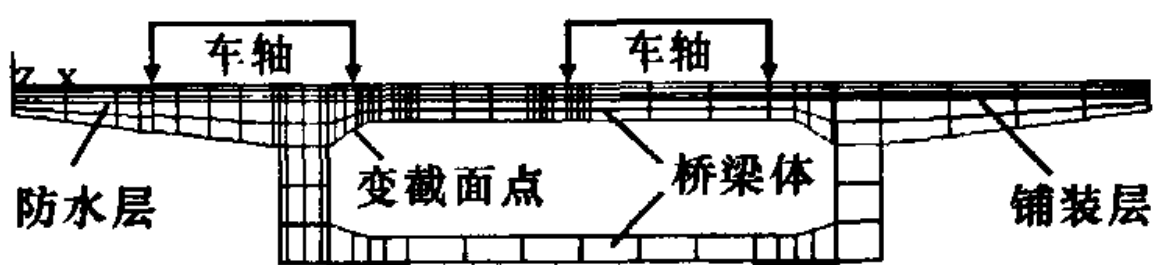


图 1 箱梁模型

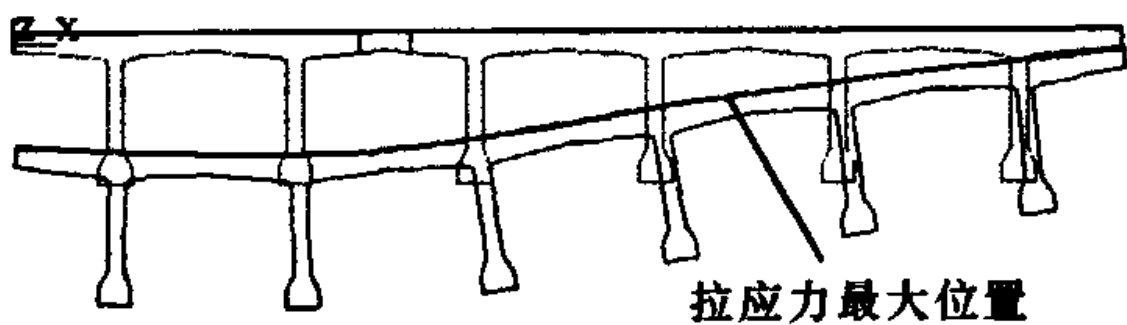


图 2 T 梁横截面的变形(前、后)

表 2 模型结构参数

桥梁形式	T 形梁	箱 梁
横截面	5 片梁共宽 13.5	单箱单室宽 8
跨径	30	20
顶板厚	0.08~0.20	0.12~0.23
肋板高/宽	1.52/0.20	0.90/0.35

3 确定荷载最不利位置

(1)汽车布载。根据文献[7]取荷载组合:汽超-20+制动力+冲击力。制动系数  $\mu$  取一列车队的 10%,但不小于一辆重车的 30%<sup>[8]</sup>;由于模型中一跨布置两并排重车,为充分考虑局部效应,假设一辆重车紧急制动,取  $\mu$  为 0.5,  $F$  (水平制动力) =  $\mu G$  (重力)<sup>[9-10]</sup>。横向布载按照偏载、中载和左右对称偏载分别布置;纵向双车队单向并排行驶,按照使跨中、1/4 跨、3/4 跨产生最大弯矩来布载,纵横向两两组合使水泥铺装层拉应力、层间剪应力和防水层拉应力最大,经比较确定最后的布载形式为横向偏载、纵向 1/2 跨弯矩最大相组合的布载。

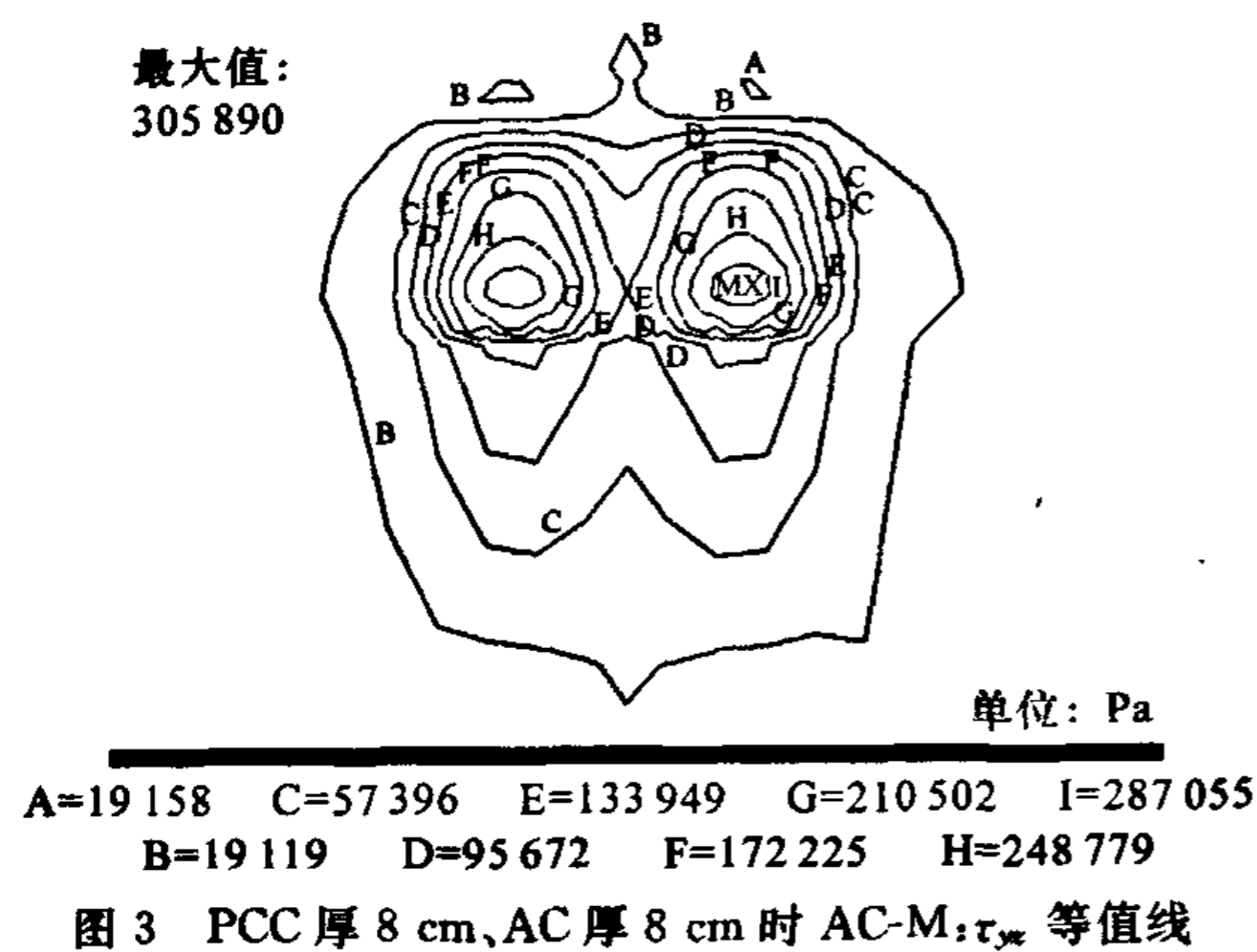
(2) 车轮接地面积。由于文献[7]<sup>12</sup>对接地面积规定主要从桥梁设计角度来考虑,所以比较笼统。本文为考虑车轮局部效应,同时更接近实际而采用双轮接地,根据文献[11]

$$A = 0.008 P + 152, p = P/A$$

式中:  $A$  为接地面积;  $P$  为轴重;  $p$  为接地压强。  $A$  和  $p$  可由计算得到。本文采用车队的 14 t 重轴车轮接地形式,根据文献[12] 确定为:单轮宽 18 cm,轮隙 10 cm,接地长 24 cm。

(3) 为了便于简化和统一,基本约定如下:AC 为沥青混凝土铺装层;PCC 为水泥混凝土铺装层;M 为防水层;AC-M 为沥青混凝土铺装和防水层层间;PCC-M 为水泥混凝土铺装层和防水层层间;  $\sigma_1$  为最大拉应力(第一主应力);  $\tau_{xy}$  为接触层间横桥向剪应力;  $\tau_{yz}$  为接触层间顺桥向剪应力;  $\sigma_y$  为接触层间法向拉应力。

(4) 计算表明,简支一跨箱梁、T 梁水泥铺装层横桥向拉应力远大于纵桥向拉应力,在箱梁肋板梗翼变截面点和 T 梁翼缘板交接处对应水泥铺装层顶出现最大拉应力值(图 1 和图 2),同时 T 梁肋板顶对应铺装层拉应力也较大。  $\tau_{yz}$  最大值出现在重车后轴 14 t 车轮底靠前处,  $\tau_{xy}$  最大值出现在车轮横向边缘。剪应力值沿车轮向外侧迅速降低,局部效应明显(图 3)。



## 4 PCC、AC 的相互影响

为了考虑 AC、PCC 厚度对铺装层以及层间应力的影响,变换 AC 或 PCC 厚度,进行了以下 5 种情况的敏感性分析。

### 4.1 变换 PCC 厚度,AC 厚度 8 cm 不变

(1) 计算表明,水泥铺装层厚度对接触层间法向拉应力、顺桥向剪应力影响很小。随着 PCC 厚度增加,层间横桥向剪应力减小且减小趋势变缓。单箱梁桥可以在设置 PCC 垫层的上面加铺 AC 层,也可以在没有设置 PCC 垫层的情况下直接加铺 AC 层。

通过比较箱梁的这两种铺装情况,结果如表 3 所示。PCC 为 2、4、6、8、10 cm 时加铺 8 cm AC 的复合式铺装的 AC-M:  $\tau_{xy}$ ,相对无垫层 PCC 的单层 AC 铺装时 AC-M:  $\tau_{xy}$  分别减小 5.01%、8.85%、11.69%、13.81%、15.48%;而 PCC-M:  $\tau_{xy}$  相对分别减小 15.52%、21.93%、26.73%、30.5%、33.44%,这表明下铺水泥垫层 PCC 能有效降低横桥向层间剪应力,而且对于降低 PCC-M:  $\tau_{xy}$  相对 AC-M:  $\tau_{xy}$  更为有效。另外发现 PCC-M 层间剪应力明显大于 AC-M 层间剪应力,尤其是横桥向剪应力  $\tau_{xy}$ ,但 AC-M 层间法向拉应力相对要大于 PCC-M 层间。

(2) T 形梁桥因为梁之间连结需加铺水泥垫层,一般不直接加铺 AC。表 4 计算结果表明,当 PCC 厚度由 2 cm 增加到 10 cm 时,AC-M:  $\tau_{xy}$  降低 24.88%,平均 0.016 MPa/2 cm;PCC-M:  $\tau_{xy}$  降低 39.72%,平均 0.276 MPa/2 cm;PCC-M:  $\tau_{yz}$  降低 17.88%。表明 PCC 厚度对  $\tau_{xy}$  影响显著。

表 3 接触面间应力值随 PCC 厚度变化(箱梁桥) MPa

PCC 厚度/cm	AC-M: $\sigma_y$	AC-M: $\tau_{xy}$	AC-M: $\tau_{yz}$	PCC-M: $\sigma_y$	PCC-M: $\tau_{xy}$	PCC-M: $\tau_{yz}$
0	0.122 60	0.221 71	0.311 14	0.098 734	0.386 51	0.386 51
2	0.113 27	0.210 60	0.309 51	0.102 190	0.326 51	0.342 21
4	0.113 72	0.202 10	0.307 93	0.101 260	0.301 75	0.333 93
6	0.114 30	0.195 80	0.306 76	0.100 520	0.283 19	0.329 48
8	0.114 19	0.191 10	0.305 89	0.099 931	0.268 63	0.326 44
10	0.114 31	0.187 40	0.305 25	0.099 459	0.257 26	0.324 15

表 4 接触面间应力值随 PCC 厚度变化(T 形梁桥) MPa

PCC 厚度/cm	AC-M: $\sigma_y$	AC-M: $\tau_{xy}$	AC-M: $\tau_{yz}$	PCC-M: $\sigma_y$	PCC-M: $\tau_{xy}$	PCC-M: $\tau_{yz}$
2	0.125 0	0.257 2	0.315 9	0.119 6	0.457 9	0.382 1
4	0.126 0	0.230 8	0.307 8	0.101 0	0.385 3	0.357 3
6	0.126 2	0.213 4	0.302 9	0.104 6	0.336 8	0.330 1
8	0.126 1	0.201 6	0.299 9	0.106 3	0.301 3	0.320 2
10	0.126 1	0.193 2	0.298 0	0.107 3	0.276 0	0.313 8

### 4.2 变换 PCC 厚度、AC 厚度 8 cm 不变与单层 PCC 比较

从图 4、图 5 计算结果可以看出:随着水泥铺装厚度增大,设有 AC 的 PCC 顶第一主应力(拉应力)  $\sigma_1$  显著低于没有设置 AC 的单层 PCC,表明设置 AC 对降低 PCC 拉应力有明显效果。而保持 AC 厚度 8 cm 不变,变化 PCC 厚度,从 2 cm 增加到 8 cm,箱梁 PCC 顶  $\sigma_1$  下降 31.29%;T 梁 PCC 顶下降 46.67%,这表明增加 PCC 厚度也能较好地降低 PCC 顶  $\sigma_1$ ,但效果远不如增加 AC 厚度。

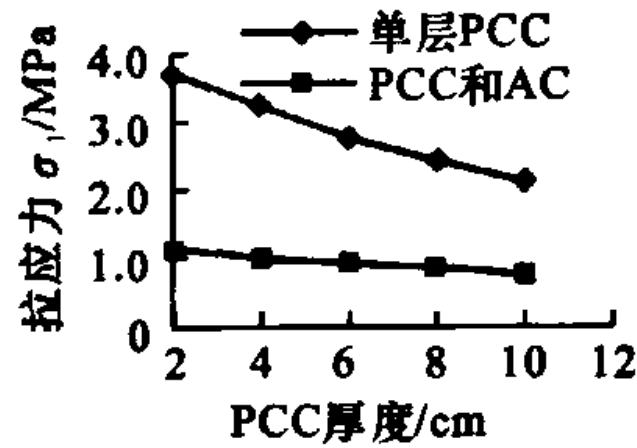


图4 水泥铺装层 $\sigma_1$ 与PCC厚度的关系（箱梁）

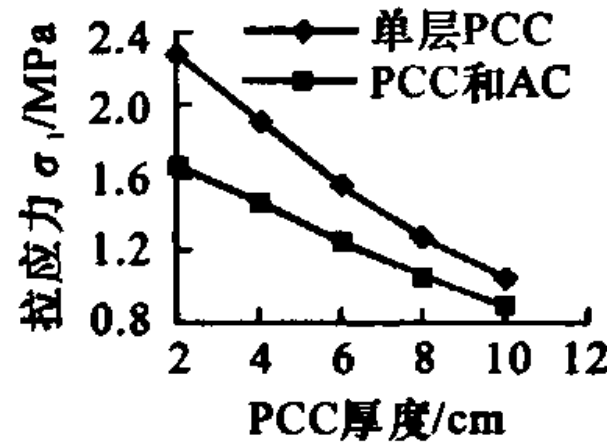


图5 水泥铺装层 $\sigma_1$ 与PCC厚度的关系（T梁）

表 5 PCC 拉应力以及接触面间应力值随 AC 厚度变化

MPa

AC 厚度/cm	AC-M: $\sigma_y$		AC-M: $\tau_{xy}$		PCC-M: $\sigma_y$		PCC-M: $\tau_{xy}$		PCC 顶 $\sigma_1$	
	箱梁	T 梁	箱梁	T 梁	箱梁	T 梁	箱梁	T 梁	箱梁	T 梁
2	0.193 90	0.172 70	0.478 96	0.391 30	0.166 66	0.142 100	0.482 61	0.450 30	2.380 7	1.283 30
4	0.165 30	0.155 00	0.387 21	0.360 70	0.147 22	0.130 800	0.391 80	0.412 70	2.333 3	1.210 90
6	0.139 36	0.138 97	0.336 10	0.328 26	0.122 71	0.117 790	0.361 16	0.360 65	2.282 3	1.118 50
8	0.114 19	0.126 17	0.305 89	0.295 60	0.099 93	0.106 430	0.326 44	0.320 14	2.226 0	1.051 60
10	0.099 39	0.113 20	0.278 28	0.261 80	0.094 02	0.094 968	0.299 47	0.286 93	2.166 7	0.979 94

均0.018 16 MPa/2 cm; PCC-M:  $\tau_{xy}$  减小 37.95%, 平均 0.045 78 MPa/2 cm; PCC 顶  $\sigma_1$  降低 27.421%, 平均 0.028 29 MPa/2 cm。所以 AC 厚度对  $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$  影响显著, 对 PCC 顶  $\sigma_1$  影响也较大。

(2) T 梁。AC-M:  $\sigma_y$  减小 41.9%, 平均 0.013 22 MPa/2 cm; AC-M:  $\tau_{xy}$  减小 39.45%, 平均 0.029 15 MPa/2 cm; PCC-M:  $\sigma_y$  减小 35.78%, 平均 0.009 5 MPa/2 cm; PCC-M:  $\tau_{xy}$  减小 37.774%, 平均 0.030 23 MPa/2 cm; PCC 顶  $\sigma_1$  减小 41.198%, 平均 0.108 31 MPa/2 cm。表明 T 梁铺装 AC 厚度对  $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$ 、PCC 顶  $\sigma_1$  影响都很显著。

#### 4.4 变换 AC 厚度、PCC 厚度不变与单层 AC 比较

计算表明, AC 下有无 PCC 对层间  $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$  基本没有影响, 但是对  $\tau_{xy}$  影响较大(图 6), 设置 PCC 能够有效降低 AC-M:  $\tau_{xy}$ 。

#### 4.5 铺装总厚度不变

保持铺装总厚度不变, 进行不同的结构组合, 列于表 6。图 7~图 10 计算结果表明: 随着 AC 厚度减小、PCC 厚度加大, 层间  $\sigma_y$ 、 $\tau_{xy}$  明显增大, 层间  $\tau_{xy}$ 、PCC 顶  $\sigma_1$  减小。考虑到在紧急制动时  $\tau_{xy} > \tau_{xy}$ , 同时 PCC 顶  $\sigma_1$  在设置有一定厚度的 AC 铺层下其值不大, 所以在铺装总厚度不变时, 建议采取偏厚的 AC 和偏薄的 PCC。

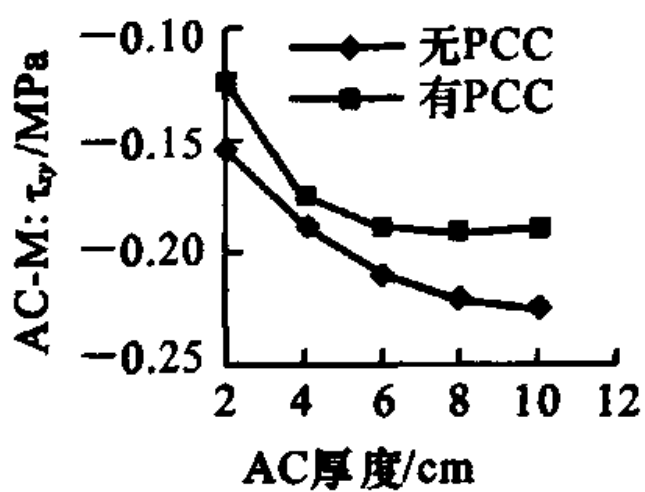


图6 AC-M:  $\tau$ 与AC厚度的关系（箱梁）

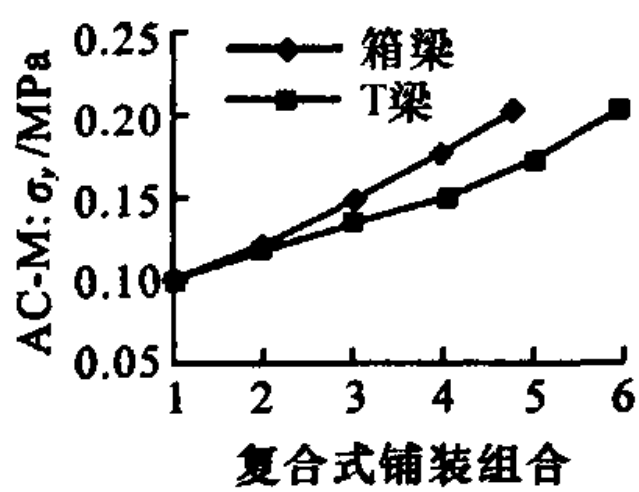


图7 AC-M:  $\sigma$ 随复合式铺装不同组合的变化

#### 4.3 变换 AC 厚度, PCC 保持 8 cm 厚度

当 PCC 厚度保持 8 cm, AC 厚度从 2 cm 增加到 10 cm 时, 计算结果如表 5 所示。

(1) 箱梁。AC-M:  $\sigma_y$  减小 48.742%, 平均 0.023 63 MPa/2 cm; AC-M:  $\tau_{xy}$  减小 41.899%, 平均 0.050 17 MPa/2 cm; PCC-M:  $\sigma_y$  降低 43.586%, 平

表 6 铺装组合

铺装组合序号	1	2	3	4	5	6
箱梁(PCC + AC)/cm	2+10	4+8	6+6	8+4	10+2	
T 梁(PCC + AC)/cm	2+12	4+10	6+8	8+6	10+4	12+2

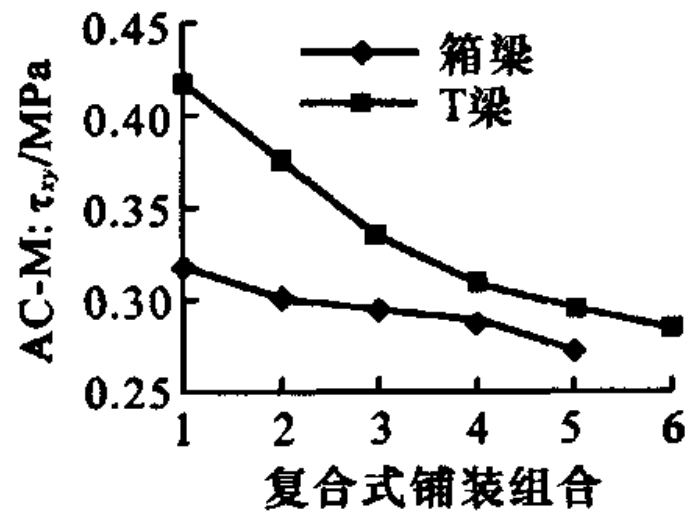


图8 AC-M:  $\tau$ 随复合式铺装不同组合的变化

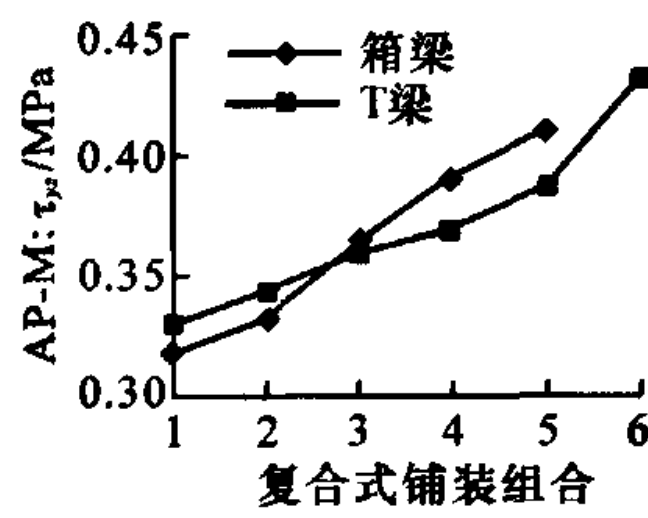


图9 AC-M:  $\sigma$ 随复合式铺装不同组合的变化

### 5 PCC、AC 对防水膜的影响

#### 5.1 PCC 厚度不变, 变换 AC 厚度

以简支一跨箱梁铺装为分析对象, 图 11 计算表明: AC 下加设 8 cm 厚 PCC 相对不设置 PCC 垫层时防水层  $\sigma_1$  值明显降低, 在 8 cm 厚 AC 铺装时, 设 PCC 和不设 PCC 防水膜  $\sigma_1$  之比为 0.57 : 1, 相差很大。同时, AC 厚度从 2 cm 增加到 10 cm, 加设 PCC 的复合铺装和单层 AC 铺装情况下防水膜  $\sigma_1$  分别降低 7.18% 和 19.95%, 表明单层 AC 铺装时, 增加 AC 厚度能更加有效地降低防水层拉应力  $\sigma_1$ 。

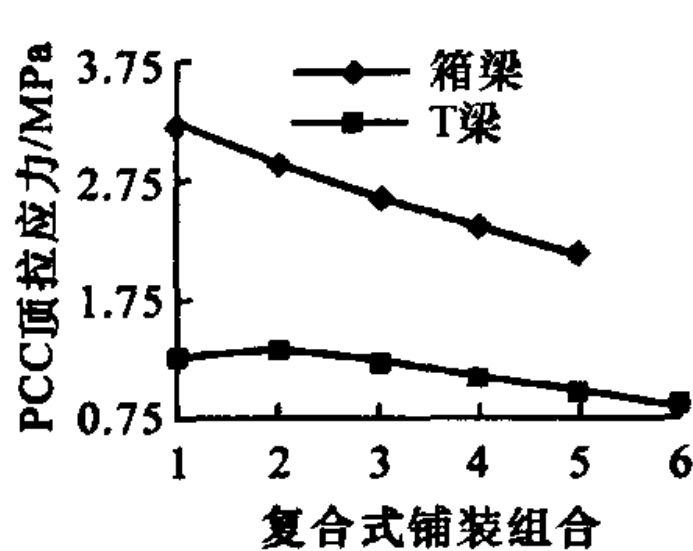


图10 PCC顶 $\sigma$ 随复合式铺装不同组合的变化

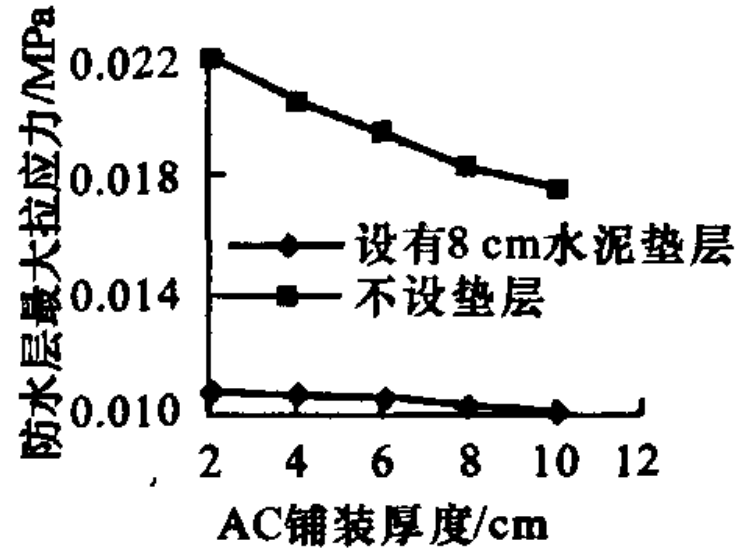


图11 在AC下设置PCC与不设PCC时与防水层 $\sigma_1$ 厚度的关系

## 5.2 AC 厚度 8 cm 不变, 变换 PCC 厚度

从图 12 计算结果看出, 随着 PCC 厚度增加, 防水层  $\sigma_1$  显著降低, PCC 厚度从 2 cm 增加到 10 cm, 防水层  $\sigma_1$  降低 40.29%, 平均 0.001 55 MPa/2 cm。

这主要是由于 PCC 加强了桥面板的整体稳定性, 抵抗了整体变形。

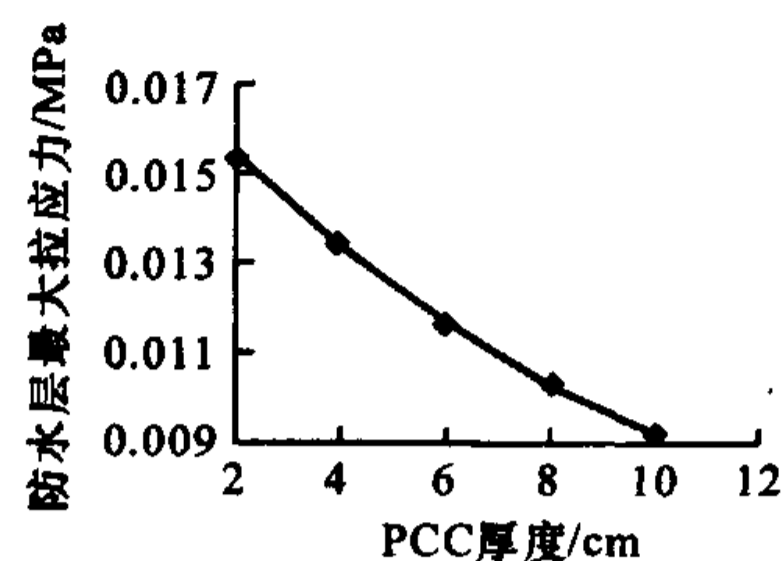


图 12 防水层  $\sigma_1$  与 PCC 厚度的关系

## 6 结 语

(1) 水泥混凝土桥梁复合式铺装的破坏形式, 可以是水泥铺装桥梁特殊部位发生拉应力破坏, 也可以是沥青铺装和防水层间以及水泥铺装和防水层间的剪切破坏和起皮脱空。

(2) 水泥铺装桥梁在箱梁肋板翼缘即顶板变截面处和 T 梁翼缘板交接处、肋板顶对应位置产生较大拉应力, 易导致纵向裂缝; 沥青铺装和防水层间以及水泥铺装和防水层间在重轮作用域出现最大剪应力, 在轮域附近周围出现最大层间法向拉应力, 容易导致起皮脱空、剪切破坏。对于复合式铺装结构设计, 建议以水泥铺装顶特殊部位的抗弯拉强度、层间抗剪切强度和法向抗拉强度作为设计指标。

(3) 增大水泥铺装厚度能有效降低层间横桥向剪应力和防水层拉应力, 但对顺桥向剪应力影响不大, 对层间法向拉应力几乎没有影响。

(4) 增大沥青铺装厚度能显著降低层间法向拉应力, 有效降低顺桥向剪应力、水泥铺装和防水层拉应力。

(5) 建议设计水泥铺装偏薄、沥青铺装偏厚的复合式结构, 例如 4:6 和 5:8 的形式。

## 参考文献:

## References:

- [1] Rasmus W, John F O, Henrik S, et al. Analysis of an orthotropic deck stiffened with a cement-based overlay[J]. Journal of Bridge Engineering, 2007, 12(3):350-363.
- [2] 陈仕周, 倪小军. 桥面铺装与路面温度差异研究[J]. 中国公路学报, 2005, 18(2):56-59.  
CHEN Shi-zhou, NI Xiao-jun. Study of temperature difference between bridge deck pavement and road pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2):56-59.
- [3] 钱振东, 罗 剑. 正交异性钢桥面板铺装层受力分析[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(2):10-13.  
QIAN Zhen-dong, LUO Jian. Pavement stress analysis of orthotropic steel deck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(2):10-13.
- [4] 王 虎, 胡长顺, 王秉纲. 混凝土桥面混凝土铺装结构设计和施工技术[R]. 西安: 长安大学, 1999.
- [5] 王 虎, 徐勤武. 混凝土桥水泥混凝土铺装荷载应力[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(3):11-15.  
WANG Hu, XU Qin-wu. Load stress in concrete pavement on concrete bridges[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(3):11-15.
- [6] 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, 2000.
- [7] JTJ 021-89, 公路桥涵设计通用规范[S].
- [8] 张肖宁, 李 智, 徐 伟. 混凝土桥面铺装粘结层体系力学性能试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, 35(4):126-130.  
ZHANG Xiao-ning, LI Zhi, XU Wei. Mechanics performance of binding course system for concrete bridge deck overlay[J]. Journal of Harbin Architecture University, 2002, 35(4):126-130.
- [9] 裴建中, 李鹏辉, 王秉纲. 桥面防水层施工技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2006, 23(2):40-43.  
PEI Jian-zhong, LI Peng-hui, WANG Bing-gang. Study of construction technology of waterproofing layer for concrete bridge decks[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2006, 23(2):40-43.
- [10] 高 英, 黄晓明, 许 涛. 水泥混凝土桥梁沥青混凝土铺装层的疲劳性能[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(1):39-43.  
GAO Ying, HUANG Xiao-ming, XU Tao. Fatigue characteristic of asphalt concrete pavement on cement concrete bridge deck[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(1):39-43.
- [11] 谭 权. 重载道路沥青路面设计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.
- [12] 谢水友, 郑传超. 轮胎接触压力对沥青路面结构的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(1):12-16.  
XIE Shui-you, ZHENG Chuan-chao. Effects of tire contact pressure on asphalt pavement structure[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(1):12-16.