

文章编号: 0451-0712(2005)02-0032-05

中图分类号: U433.33

文献标识码: B

大跨径钢桥桥面铺装设计方法

刘振清¹, 黄卫², 林广平²

(1. 北京市市政工程总公司研究院 北京市 100037; 2. 东南大学 ITS 研究中心 南京市 210096)

摘 要: 首先提出了大跨径钢桥桥面铺装设计基本原则,接着选取大跨径钢桥桥面铺装设计的标准轴载,并给出设计年限内一个车道上标准轴载的累计当量作用次数换算公式。然后根据大跨径钢桥桥面铺装设计必须控制的主要破坏形式,提出了桥面铺装厚度设计控制指标和验算指标及其容许值的确定方法。给出了大跨径钢桥桥面铺装设计涉及的材料特性参数及其试验方法,最后给出大跨径钢桥桥面铺装设计步骤及框图,并提供一个设计算例。

关键词: 大跨径钢桥; 桥面铺装; 设计方法

随着交通事业的快速发展,已建成或正在建设大跨径桥梁逐渐增多,国内外的经验表明,大跨径桥梁(包括斜拉桥和悬索桥)最有效的结构形式之一是加劲的钢箱梁桥。大跨径钢箱梁桥桥面系大多数采用正交异性桥面板和沥青混合料铺装,桥面铺装一般由防锈层、粘结层、沥青混合料铺装层构成,直接铺筑于钢箱梁正交异性桥面板之上,总厚度在 35~80 mm 之间。由于大跨径钢桥桥面铺装的使用条件、施工工艺、质量控制与要求的特殊性,对它的强度、抗疲劳性能、抗车辙、抗剪切性能及变形协调性等均有较高的要求,国内外尚未得到普遍有效的解决。对大跨径钢桥桥面铺装特殊的使用条件、铺装材料的选择、结构组合设计、施工工艺、质量监控及日常养护的考虑欠周,容易出现各种病害,从而对桥梁的结构耐久性有着很大的威胁,对桥面铺装行车的安全性与舒适性有着直接的影响。

国内外现行的公路桥梁和路面规范中,关于桥面铺装的设计还是空白,这使得大跨径钢桥桥面铺装的设计无章可循。在实际桥梁的设计中,铺装层只作为恒载用于桥梁结构的验算,设计者对其本身的设计并没有做太多的考虑,这就从设计的角度上给大跨径钢桥桥面铺装可能出现的早期病害埋下了隐患。因此,必须研究大跨径钢桥桥面铺装设计方法,以便指导大跨径钢桥桥面铺装的设计、施工与养护,也为其相关规范的制定奠定基础。

1 大跨径钢桥桥面铺装设计基本原则

在大跨径钢桥桥面铺装设计过程中,首先选择钢桥面铺装材料(包括铺装层材料和粘结层材料)方案;接着完成沥青混合料和粘结层材料设计,控制铺装层沥青混合料的高温稳定性、铺装层与钢桥面板间的抗剪切性能和变形协调性,同时获得相关的材料特性参数;然后对钢桥面沥青混合料铺装结构进行分析与设计,确定桥面铺装厚度及桥面结构系统的各项参数,用以控制疲劳裂缝的产生,预测钢桥面沥青混合料铺装的疲劳寿命及使用年限,并预估钢桥面热塑性类沥青混合料铺装车辙,用以验证抗车辙性能是否满足要求,使得钢桥面铺装达到预期的使用性能。值得指出的是,这几个阶段是相辅相成的,大跨径钢桥桥面铺装设计基于以下的基本原则。

(1)分析大跨径钢桥桥面铺装的使用条件,包括气候与环境条件、交通条件和桥面铺装的受力状态。以弹性力学理论为基础,应用通用有限元软件分析钢桥面铺装体系的受力特性,采用冲击系数反映动力荷载响应。

(2)分析大跨径钢桥桥面铺装可能出现的主要破坏类型,明确钢桥面不同沥青混合料铺装设计必须控制的主要破坏形式,提出钢桥面铺装结构设计指标体系。

(3)提出基于疲劳指标等效的钢桥面铺装轴载换算方法,对于钢桥面热塑性类沥青混合料铺装,进一步提出桥面铺装车辙预估方法及模型,以及基于

车辙指标等效的轴载换算方法。选取钢桥面设计
的标准荷载为沥青路面设计的标准轴载 BZZ-100, 对
于已建桥梁的钢桥面铺装结构进行分析与修复设
计, 也可以采用实际调查所得的交通资料, 确定不同
车型的系列荷载作为设计与计算荷载。

(4) 大跨径钢桥桥面铺装设计材料特性参数应
通过标准试验方法确定, 因此, 钢桥面铺装结构分
析与设计应在确定铺装材料方案和完成混合料设计并
获得相关的材料特性参数之后进行。由于层间接触
条件对桥面铺装的受力状态有很大的影响, 既要考
虑连续状态又要考虑滑动状态, 必要时还要考虑中
间状态, 因此设计时还需确定粘结层材料特性参数。

(5) 根据大跨径钢桥桥面铺装力学计算与分析
结果, 铺装层承受负弯矩, 控制应力/应变是主梁腹
板、纵梁、纵向加劲肋和横梁上方铺装层表面出现
的最大拉应力/应变, 它是导致沥青混合料铺装层产
生疲劳开裂的主要影响因素, 应以铺装层表面容许最
大拉应变作为钢桥面铺装厚度设计的控制标准。对
于钢桥面热塑性类沥青混合料铺装, 还需根据预估
的车辙深度与容许车辙深度来验算钢桥面铺装抗车
辙性能是否满足使用性能要求。

(6) 铺装层与钢桥面板间的抗剪切性能和变形
协调性, 可以通过正确的粘结层材料选择与设计、可
靠的施工质量与合理的养护, 以及桥面铺装材料与
钢桥面板的线收缩特性得以控制与改善。

2 大跨径钢桥桥面铺装设计标准轴载及轴载换算

交通条件是大跨径钢桥桥面铺装结构分析与设
计的基础, 不同的交通量及交通组成中每一车型比
例、额定载重、轴型与轮组及各级轴载分布率(轴载
谱)作用对桥面铺装的破坏程度是不同的。因此, 对
交通量及交通组成的正确合理估计是确定钢桥面铺
装材料和结构设计指标容许值及其使用寿命的重要
依据。目前, 大跨径钢桥桥面铺装设计仅给出根据新
建桥梁临近已建的公路或桥梁调查与统计的交通量
及交通组成中每一车型比例、额定载重、超载车比
例、超载率估算得到未来各特征年的过江交通量。更
重要的是要通过调查新建或改建大跨径桥梁交通量
及交通组成中每一车型的比例、轴型与轮组及各级
轴载分布率(轴载谱)资料, 统计计算得到年平均日
交通量(AADT), 由于载重吨位小于 25 kN 的车辆
对钢桥面铺装的力学影响是很轻微的, 只需考虑扣
除载重吨位小于 25 kN 的车辆得到的有效年平均日

交通量(有效 AADT)。根据钢桥面沥青混合料铺装
体系轴载换算方法, 可以换算得到一年内标准轴载
的双向日平均当量作用次数, 并考虑车道系数、合理
的年增长率和关键年份交通量的增减来计算设计年
限内, 一个车道上标准轴载的累计当量作用次数。对
于设计使用年限较长的桥梁, 为更精确的计算设计
年限内钢桥面沥青混合料铺装体系标准轴载的累计
当量作用次数, 应按若干个时段进行分段, 分别计算
每个时段内标准轴载的累计当量作用次数, 再计算
设计使用年限内钢桥面沥青混合料铺装体系标准轴
载的累计当量作用总的次数。

根据基于疲劳等效的钢桥面铺装轴载换算方
法, 当以钢桥面铺装层表面最大拉应力或拉应变为
大跨径钢桥桥面铺装结构设计指标时, 凡轴载大于
25 kN 的各级轴载(包括车辆的前、中、后轴)的作用
次数, 均应按式(1)换算成标准轴载 BZZ-100 的当
量作用次数。

$$N = \sum_{i=1}^m C_1 \cdot C_2 \cdot \left(\frac{P_i}{P}\right)^n \cdot N_i \tag{1}$$

式中: N 为标准轴载的当量作用次数, 次/日;
 N_i 为被换算车型的各级轴载作用次数, 次/日; P 为
标准轴载 BZZ-100, kN, 它的计算参数如表 1 所示;
 P_i 为被换算车型的各级轴载, kN; n 为轴载换算指
数; C_1 为轴型系数; C_2 为轮组系数; m 为各级轴载级
位总数。

表 1 标准轴载 BZZ-100 计算参数

标准轴载 kN	轮胎接地压力 MPa	每侧轮胎简化为单轮接地面 积/mm ²
100	0.707	460×200(含 30% 冲击系数)

于是大跨径钢桥桥面铺装设计年限内, 一个车
道上标准轴载 BZZ-100 的累计当量作用次数, 可
以按下式进行计算, 即:

$$\left. \begin{aligned} N_{eq} &= \frac{[(1+\gamma)^t - 1] \times 365}{\gamma} \cdot N_1 \cdot \eta \\ \text{或 } N_{eq} &= \frac{[(1+\gamma)^t - 1] \times 365}{\gamma(1+\gamma)^{t-1}} \cdot N_t \cdot \eta \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式中: N_{eq} 为设计年限内一个车道上标准轴载
BZZ-100 的累计当量作用次数, 次; t 为设计年限,
年; N_1 为竣工后第一年标准轴载 BZZ-100 双向
日平均当量作用次数, 次/日; N_t 为设计年限末年标
准轴载 BZZ-100 双向日平均当量作用次数, 次/

日; γ 为设计年限内交通量的平均年增长率,%,应根据实际情况调查,预测交通量增长,经分析后确定; η 为车道系数,应根据调查分析结果或参照表 2 确定。

表 2 车道系数

车道特征	单车道	双车道		四车道	六车道
		无分隔	有分隔		
车道系数 η	1.0	0.60~0.70	0.5	0.40~0.50	0.30~0.40

当上下行交通量或轻、重车比例有明显差异时,应按实际交通情况区别对待大跨径钢桥上下行的桥面铺装厚度设计。当交通流出现明显的超载时,应根据实际调查资料对标准轴载 BZZ-100 的累计当量作用次数进行适当的修正。

3 大跨径钢桥桥面铺装设计指标容许值的确定

世界各国代表性的沥青路面设计方法有以容许拉应变为结构设计的疲劳控制指标(如美国 AI 方法和欧洲 SHELL 设计方法),也有以容许拉应力为结构设计的疲劳控制指标(如前苏联和中国的《沥青路面设计规范》)。容许拉应变与容许拉应力相比,究竟何者作为设计控制指标更为合理,许多知名学者曾经对此展开过深入的研究,总的倾向认为用容许拉应变作为结构设计的疲劳控制指标较为合理。

大跨径钢桥桥面沥青混合料铺装层总厚度一般在 35~80 mm,属于一种薄层的沥青混合料面层。为控制大跨径钢桥正交异性桥面板主梁腹板、纵梁、纵向加劲肋和横梁上方铺装层表面出现的疲劳开裂,钢桥面铺装结构设计控制指标采用容许拉应变 ϵ_R 较为合理,并将它作为大跨径钢桥桥面沥青混合料铺装厚度设计的主要依据。

根据钢桥面沥青混合料铺装体系疲劳特性的室内试验及力学分析结果,并经更多的室内试验和野外测试进行修正后,可以用于确定铺装层表面容许最大拉应变 ϵ_R ,此值应大于标准轴载 BZZ-100 作用下大跨径钢桥正交异性桥面板主梁腹板、纵梁、纵向加劲肋和横梁上方铺装层表面可能出现的最大拉应变 ϵ_{\max} 计算值,即:

$$\epsilon_R \geq \epsilon_{\max} \quad (3)$$

同时,为控制大跨径钢桥桥面热塑性类沥青混合料铺装可能发生的车辙破坏,采用钢桥面热塑性类沥青混合料铺装结构设计的验算指标是桥面铺装容许车辙深度 RD ,此值应大于标准轴载 BZZ-100

重复作用一定次数后桥面铺装可能出现的车辙深度 Δh ,即:

$$RD \geq \Delta h \quad (4)$$

钢桥面热塑性类沥青混合料铺装车辙深度 RD 指标容许值可以参照沥青路面标准,由于大跨径钢桥通常是高速公路或主干线公路的连接通道,因此桥面铺装容许车辙深度 RD 应按高速公路或主干线公路沥青路面容许车辙深度标准来确定。根据国内外沥青路面车辙控制标准,将大跨径钢桥桥面铺装容许车辙深度 RD 确定为 10 mm。根据基于车辙等效的钢桥面铺装体系轴载换算方法计算荷载累计作用时间,并利用钢桥面热塑性类沥青混合料铺装车辙预估公式可以预估的车辙深度 Δh ,从而可以利用式(4)来验算由铺装层表面容许最大拉应变指标设计的钢桥面热塑性类沥青混合料铺装结构是否满足抗车辙性能要求。

4 大跨径钢桥桥面铺装材料设计参数

大跨径钢桥桥面铺装设计涉及的材料特性参数主要是沥青混合料铺装层弹性模量和泊松比,铺装层弹性模量采用抗压回弹模量,它与泊松比均按有关规范规定的试验方法实测。当验算钢桥面热塑性类沥青混合料铺装抗车辙性能时,涉及到车辙有效温度和蠕变模型的回归系数,前者可以通过不同温度下的车辙试验结果来计算,后者可以通过前者计算的车辙有效温度下蠕变试验结果回归分析来确定。此外,模拟层间接触条件还要涉及到粘结层材料有关参数。

5 大跨径钢桥桥面铺装设计步骤及流程

在上述的分析与研究基础上,提出了大跨径钢桥桥面铺装设计方法,其设计流程如图 1 所示。

大跨径钢桥桥面铺装设计应按如下步骤进行:

(1)分析大跨径钢桥桥面铺装的气候与环境使用条件,主要明确钢桥面沥青混合料铺装的温度使用条件和动力荷载响应;

(2)分析大跨径钢桥桥面铺装的交通使用条件,应用式(1)可以计算一年内标准轴载的双向日平均当量作用次数 N ,再用式(2)可以计算设计年限内一个车道上标准轴载 BZZ-100 的累计当量作用次数 N_{eq} ;

(3)确定大跨径钢桥桥面沥青混合料铺装材料方案,分析铺装材料特性,按有关规范规定的试验方法实

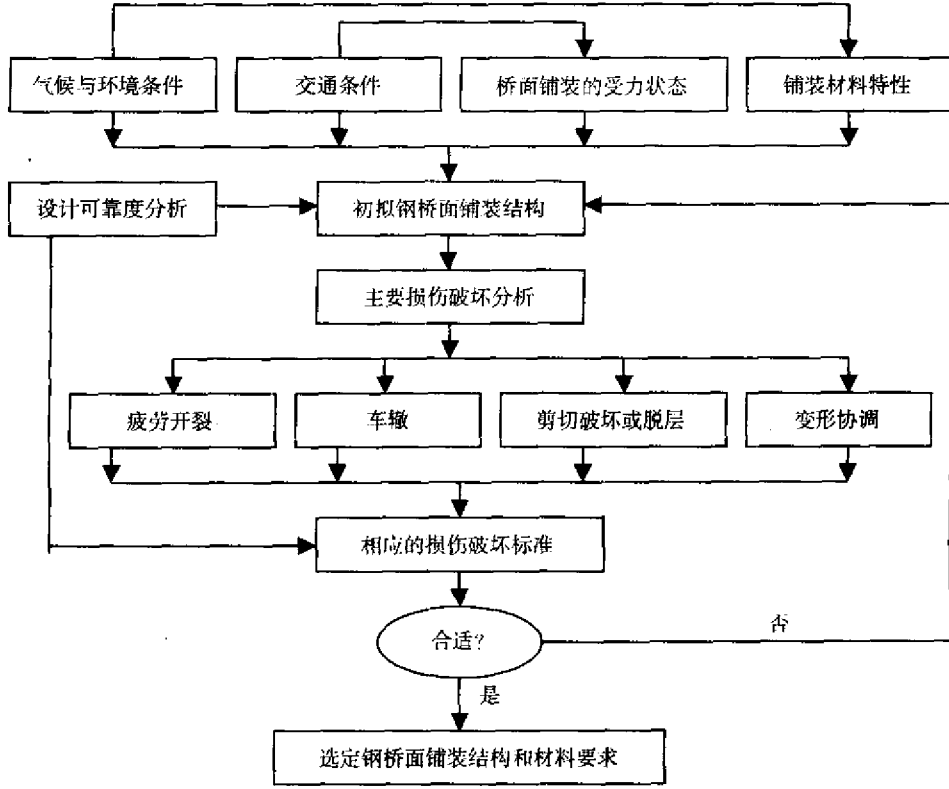


图 1 大跨径钢桥桥面铺装设计流程

测沥青混合料铺装层抗压回弹模量、泊松比等材料特性参数。对于钢桥面热塑性类沥青混合料铺装,通过不同温度下的车辙试验结果来计算沥青混合料铺装层车辙有效温度,并通过该车辙有效温度下的蠕变试验结果回归分析得到蠕变模型的回归系数;

(4)分析钢桥面不同沥青混合料铺装可能出现的主要破坏形式,明确钢桥面铺装设计必须控制的主要破坏形式,从而确定钢桥面铺装结构设计控制指标和验算指标;

(5)对于给定的钢箱梁正交异性桥面板及铺装结构与材料参数,拟定 3 个或 3 个以上的铺装厚度。应用通用有限元软件,分别计算拟定的钢箱梁正交异性桥面板及铺装结构与材料参数下的铺装层表面最大拉应变 ϵ_{\max} ,并建立该计算值与铺装厚度的回归拟合模型;

(6)将设计年限内一个车道上标准轴载的累计当量作用次数 N_{eq} 代入铺装层表面容许最大拉应变计算公式,可计算得到铺装层表面容许最大拉应变 ϵ_R ;

(7)令式(3)中的 $\epsilon_R = \epsilon_{\max}$ 成立,从而可以求得钢桥面沥青混合料铺装厚度 h 。

(8)对于钢桥面热塑性类沥青混合料铺装,还需

验算由疲劳设计的钢桥面热塑性类沥青混合料铺装抗车辙性能是否满足式(4),即 $\Delta h \leq 10 \text{ mm}$ 。若满足,则选定钢桥面铺装结构及桥面结构系统的各项参数,确认铺装层沥青混合料材料设计的合理性,否则必须修正由铺装层表面容许最大拉应变设计的铺装结构,修正后同样需满足疲劳性能要求;

(9)通过正确的粘结材料选择与设计可靠的施工质量及合理的养护,以及铺装材料与钢桥面板的线收缩特性可以控制与改善铺装层与钢桥面板间的抗剪切性能和变形协调性;

(10)在条件许可情况下,进行大跨径钢桥桥面沥青混合料铺装结构可靠度分析与设计。

6 设计算例

国内某长江大跨径钢箱梁桥,设计为双向六车道高速公路,采用环氧沥青混凝土铺装。正交异性钢桥面板有关参数:钢桥面板厚度 $h_3 = 14 \text{ mm}$ 、弹性模量 $E_3 = 210\ 000 \text{ MPa}$ 、泊松比 $\mu_3 = 0.30$,横隔板间距 $L = 3\ 220 \text{ mm}$ 、厚度 $t_1 = 10 \text{ mm}$,纵隔板厚度 $t_2 = 10 \text{ mm}$,加劲肋上口宽度 $B = 300 \text{ mm}$ 、高度 $H = 280 \text{ mm}$ 、厚度 $b = 6 \text{ mm}$;环氧沥青混凝土铺装层有

关参数:弹性模量比 $E_3/E_1=350$ 、泊松比 $\mu_1=0.25$, 钢桥面铺装设计使用年限为 15 年。试设计桥面环氧沥青混凝土铺装厚度。

根据文献[6]并应用式(1)可以计算大跨径钢箱梁桥一年内标准轴载的双向日平均当量作用次数 N_1 为 3.347 1 万次,再应用式(2)可以计算设计年限内一个车道上标准轴载 BZZ-100 的累计当量作用次数 N_{eq} 为 13 585.66 万次。

根据环氧沥青混凝土的材料特性可知,疲劳开裂是钢桥面环氧沥青混凝土铺装设计必须控制的主要破坏形式,钢桥面铺装厚度按疲劳标准进行设计。

拟定 4 个桥面铺装厚度 h 分别为 30、40、60、80 mm,应用通用有限元软件分别建立给定的钢箱梁正交异性桥面板及铺装结构与材料参数有限元模型,计算的铺装层表面最大拉应变分别为 $\epsilon_{\max}=332.0、486.3、811.4、1176.8 \mu\epsilon$,建立它们与铺装厚度的回归拟合模型为:

$$\epsilon_{\max}=4.2h^{1.2861} \quad (R^2=0.9998) \quad (5)$$

根据建立并经修正后的疲劳方程和设计年限内一个车道上标准轴载 BZZ-100 的累计当量作用次数 N_{eq} ,可以计算铺装层表面容许最大拉应变为 $\epsilon_R=778.6 \mu\epsilon$ 。

令 $\epsilon_R=\epsilon_{\max}$ 成立,求得桥面铺装厚度 $h=58$ mm,故该大跨径钢箱梁桥桥面环氧沥青混凝土铺装厚度为 58 mm。

7 结语

通过本文的研究,提出了大跨径钢桥桥面铺装设计方法,即以弹性力学理论为基础,应用通用有限元软件分析钢桥面铺装体系受力特性,采用冲击系数反映动力荷载响应;为控制钢桥面沥青混合料铺装疲劳开裂,提出钢桥面铺装结构设计控制指标为铺装层表面容许最大拉应变 ϵ_R ,且必须满足 $\epsilon_R \geq$

$\epsilon_{\max}, \epsilon_{\max}$ 的计算可以采用有限元法并借助通用有限元软件。同时为控制钢桥面热塑性类沥青混合料铺装可能发生的车辙破坏,还需采用设计的验算指标是铺装层容许车辙深度 RD ,且必须满足 $RD \geq \Delta h$, Δh 的预估可以利用本文提出的钢桥面热塑性类沥青混合料铺装车辙预估公式。选取大跨径钢桥桥面铺装设计标准轴载为 BZZ-100,并给出了设计年限内一个车道上标准轴载的累计当量作用次数 N_{eq} 换算公式。根据经修正后的疲劳方程和设计年限内一个车道上标准轴载的累计当量作用次数,可以确定铺装层表面容许最大拉应变。钢桥面热塑性类沥青混合料铺装容许车辙深度参照国内外沥青路面车辙控制标准,确定为 10 mm;大跨径钢桥桥面铺装设计涉及的材料特性参数主要是沥青混合料铺装层模量和泊松比,铺装层模量采用抗压回弹模量,它与泊松比均按有关规范规定的试验方法实测。当验算钢桥面热塑性类沥青混合料铺装抗车辙性能时,涉及到车辙有效温度和蠕变模型的回归系数,可以通过车辙和蠕变试验,并采用回归分析方法来计算。

参考文献:

- [1] 江苏省长江公路大桥建设指挥部,东南大学. 江阴长江公路大桥钢桥面浇注式沥青混凝土铺装研究(桥面铺装材料与结构研究技术报告)[R]. 2000.
- [2] 潘世建,杨盛福. 厦门海沧大桥建设丛书——第七册/第八册[M]. 北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 南京长江第二大桥建设指挥部,东南大学. 南京长江第二大桥钢桥面环氧沥青混凝土铺装技术及应用[R]. 2000.
- [4] 润杨长江公路大桥建设指挥部,东南大学. 润杨长江公路大桥钢桥面铺装技术研究阶段报告[R]. 2003.
- [5] JTJ 001-97,公路工程技术标准[S].
- [6] 江苏省交通厅公路局,东南大学交通学院. 超载运输对公路使用性能影响的研究[R]. 2001.

井冈山通了高速公路

经过两万多名建设者近 15 个月的紧张施工,江西泰和至革命圣地井冈山高速公路胜利完成各项建设任务,于 2005 年 1 月 22 日开始试营运开通。

泰井高速公路是中国井冈山干部学院的四大配套项目之一;它东接赣粤高速公路,西连革命圣地井冈山茨坪,始于江西吉安市泰和县南源垅,终于井冈山厦坪镇,设连接线至茨坪,途经泰和县、吉安县、井冈山市的 10 个乡、镇(场),全长 82.6 km。该路建成通车后对提升井冈山的旅游资源优势,促进革命老区的经济发展,提升江西“承东启西,沟通南北”的区位优势具有十分重要的意义。