

# 正交异性钢桥面铺装有限元分析方法的比较

宋君超<sup>1</sup>, 周艳<sup>2\*</sup>

(1. 济南黄河路桥建设集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东建筑大学 道路与交通工程山东省高校重点实验室)

**摘要:** 目前用于正交异性钢桥面铺装结构受力研究的有限元方法有5种: 混合单元法、子模型法、预应力简化模型法、整体模型法、局部简化模型法。研究建立相同条件的5种有限元模型, 应用单梁模型对混合单元模型的正确性进行了验证, 并详细分析了施加横向和纵向预应力的对桥面铺装各向受力的影响。将各模型计算得到的应力应变结果与整体模型法计算得到的应力应变进行比较, 最终得出混合单元法所得的应力应变最接近整体模型法所得结果。

**关键词:** 钢桥面铺装; 混合单元法; 预应力简化模型法; 整体模型法; 简化模型法

## 1 引言

针对正交异性钢桥面板结构铺装的问题, 研究人员大多运用有限元分析法。日本学者采用有限单元法, 通过8节点空间等参单元分析了带加劲肋的桥面顶板, 得出了车辆荷载作用下桥面铺装表面出现最大横向拉应力的位置, 并且从控制铺装层受拉破坏的角度提出了加劲肋间距、横梁间距、钢板厚度等参数的推荐值。欧美的学者也曾对桥面板进行了有限元分析, Gunther 等从钢桥面板厚度、主梁附近补强加劲肋、沥青铺装层的材料特性及铺装层强度等方面探讨了影响铺装层耐久性的因素。

中国正交异性钢桥面铺装的受力分析数值模型有整体模型法、多尺度模型法(混合单元法)、子模型法、简化模型法等。

混合单元法多用于土木工程和桥梁工程力学计算中, 极少用于桥面铺装的应力分析中。此法是将杆系模型与梁板壳模型相结合的一种有限元方法, 对与研究相关部位及对结果感兴趣的构件用板壳单元模拟, 其他部位用梁单元模型。

子模型法一般采用梁单元对整体模型进行计算分析, 然后用板壳单元建立需详细分析的区域子模型, 并划分较细的单元网格, 子模型的边界条件由整体模型相应位置的节点位移或插值确定。

预应力模型法在局部桥面系计算模型中, 将整体

的不安全。

## 参考文献:

- [1] 王亚军, 于坤, 蔡仕强. 公路预应力空心板梁桥单梁试验及评定[J]. 桥梁建设, 2011(5).
- [2] 张志. 空心板铰缝破坏机理及防治措施研究[J]. 山西建筑, 2009(35).
- [3] 成琛, 沈成武, 许亮. 用铰接板(梁)法计算有损伤桥梁的横向分布系数[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2004(2).
- [4] 潘桂梅, 李平杰, 马牛静. 旧铰接板梁桥横向分布系数现

场试验研究[J]. 中外公路, 2006(2).

- [5] 冷艳玲, 张劲泉, 程寿山, 等. 装配式混凝土空心板梁桥单板受力问题的数值解析[J]. 公路交通科技, 2013(5).
- [6] 姚玲森. 桥梁工程[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [7] 贾艳敏, 高力. 结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [8] 肖玉辉, 沈立宏. 混凝土桥梁病害成因分析及对策研究[J]. 中外公路, 2004(1).
- [9] 李忠献, 陈宇, 李宁. 基于材料损伤的钢筋混凝土构件损伤模型[J]. 工程力学, 2014(6).

收稿日期: 2018-04-08

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(编号: 51408339)

作者简介: 宋君超, 男, 高级工程师. E-mail: sjczy@126.com

\* 通信作者: 周艳, 女, 副教授. E-mail: zhouyan2002100@sdjzu.edu.cn

主跨结构受力分析得到的正交异性钢桥面板第一体系应力作为初应力作用在局部桥面系模型中。

整体模型为建立带有桥面铺装结构的桥梁整体板壳模型进行分析,这种有限元分析方法是最精确的,但是受到计算机内存的限制,加之建模复杂,很少有桥面铺装分析采用此种方法。

局部简化模型法在研究正交异性钢桥面板铺装中是最为常用的一种方法。对于各种不同的桥梁类型,选取局部模型。模型通常选取纵向 3 个横隔板的间距,横向 4~8 m,一般不包含纵向腹板,有个别模型包含两道纵向腹板,横向包含 6~14 个 U 形肋,荷载为 0.7 MPa,作用面积为 0.6 m×0.2 m。

桥面铺装所处的环境比较复杂,要得到桥面铺装在实际环境中真实的受力状态,数值模拟应该尽可能接近实际情况。整体模型法是最接近实际情况的有限元方法,但由于单元数量限制,需要找到一种最接近整体模型法的替代性有限元方法。

## 2 各有限元方法模型建立

### 2.1 简支梁整体模型

简支梁桥跨径 48 m,桥宽 22 m,两侧翼板宽 3 m,单箱四室,每隔 3 m 一道横隔板,中间横隔板开人孔,端横隔板为实心截面,简支梁横截面如图 1 所示。荷载作用为双向四车道车辆荷载。

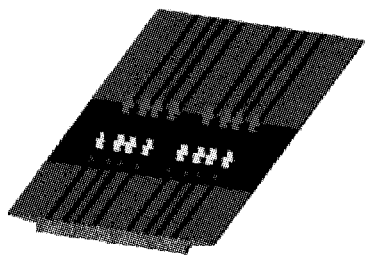


图 1 简支梁整体模型

正交异性钢箱梁顶板厚度 16 mm,横隔板厚度 10 mm,U 形肋厚度 8 mm,材料为弹性材料,钢材弹性模量  $2.1 \times 10^8$  MPa,密度  $7\,850\text{ kg/m}^3$ ,泊松比 0.3;桥面铺装材料为沥青混凝土,沥青混凝土弹性模量 1 000 MPa,密度  $2\,400\text{ kg/m}^3$ ,泊松比 0.2,沥青混凝土铺装厚度 50 mm;U 形肋顶宽 300 mm,底宽 170 mm,高度 280 mm,间距 600 mm。

### 2.2 子模型

子模型法的跨径和截面及材料均与整体模型一致,首先建立简支梁的梁单元模型,48 m 跨简支梁采

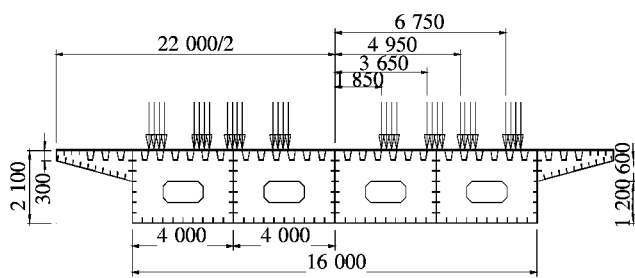
用 Beam188 单元,取跨中 24 m 段,建立子模型,子模型两端采用刚性面。

### 2.3 常见局部模型

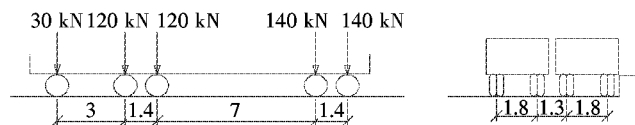
局部模型纵向 9 m,横向 5.1 m,纵向 4 块横隔板,横隔板间距 3 m。桥面板、横梁等钢结构构件采用 Shell63 单元,桥面铺装沥青混凝土采用 Solid45 单元,荷载采用 Surf154 单元施加。边界条件为顶板约束竖向平动自由度,近似模拟箱梁纵腹板对顶板的竖向约束作用;横隔板约束竖向(Z 向)和横向平动自由度(X 向)及绕横轴(X 向)、纵轴(Y 向)的转动自由度,近似模拟横隔板连续通过箱梁纵腹板。在横桥向边界上,约束顶板和横隔板的纵向(Y 向)平动自由度及绕竖轴(Z 向)和横轴(X 向)的转动自由度,近似反映端部的横隔板为跨内横隔板,而不是端部支撑横隔板。荷载作用位置如图 2 所示,作用面积 0.6 m×0.2 m,荷载为车辆荷载 550 kN 后轴一侧 70 kN,考虑车道横向四车道折减系数 0.67 和冲击系数 1.3。故施加荷载为  $70\,000 \times 0.67 \times 1.3 / (0.6 \times 0.2) = 508\,083\text{ Pa}$ ,荷载位于跨中-0.15~0.45 m 处。

### 2.4 混合单元模型

混合单元法计算结构受力是在杆单元和板壳单元交界部位满足平截面假定基础上进行计算的,混合单元计算方法与有限元法基本相同,所不同的是在形成求解方程组时计入交接部位节点的位移约束条件。



(a) 荷载横向布置图(单位:mm)



(b) 荷载纵向布置图(单位:m)

图 2 荷载作用位置

在杆系单元与壳单元界面建立约束方程,杆系单元部分采用自定义界面的梁单元,中间 5~10 m 段采用壳单元。APDL 命令流约束方程部分代码如下:

```
ce,j,0,A(j),ux,1,n7,ux,-1,n7,rotz,rotyi
```

ce,10 000+j,0,A(j),uy,1,n7,uy,-1,n7,rotx,  
-1\*rotxi

ce,20 000+j,0,A(j),uz,1,n7,uz,-1,n7,rotx,  
-1\*rotyi,n7,roty,rotxi

利用约束方程法混合单元模型计算前述 48 m 跨径简支梁桥,中段 24 m 用板壳单元建立实体模型,模型如图 3 所示。钢箱梁采用 Shell63 单元,桥面铺装采用 Solid45 单元。截面及横隔板设置同简支梁整体模型,两端梁采用 Beam188 单元,自定义截面,杆单元与板壳单元交界面采用约束方程实现位移协调。桥面板与铺装层之间完全黏结,共用节点。材料参数及结构尺寸厚度同简支梁整体模型,荷载两端梁单元施加车道荷载,桥面铺装作为二期恒载。

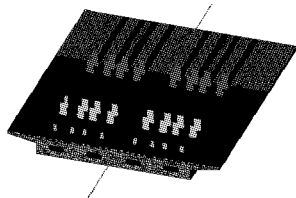


图 3 约束方程法混合单元有限元模型

## 2.5 预应力简化模型

### 2.5.1 预应力简化模型概述

预应力简化模型是在通用局部模型的基础上,在两端施加初始纵向初应力,纵向初应力施加于两端正交异性钢桥面及 U 形加劲肋上,桥面铺装中不施加,见图 4。

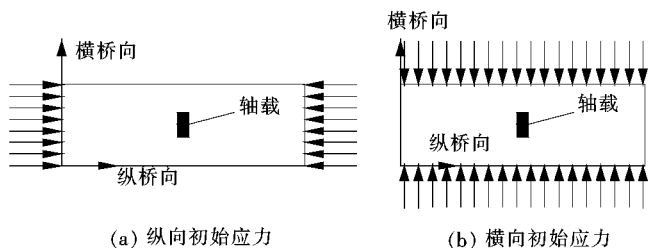


图 4 施加初始预应力的局部桥面系示意图

预应力模型参数如下:模型宽 5.1 m,含 8 条加劲肋,总长在局部模型的基础上,两端各长出 1.5 m,总长 12 m,4 跨横隔板。

模型边界条件为桥面板四周截面为固定边界,横隔板纵向端部约束法向和横向位移及绕 Y 轴、X 轴转动,横隔板底部约束纵向(Y 向)平动自由度及绕竖轴(Z 向)和横轴(X 向)的转动自由度,近似反映端部的横隔板为跨内横隔板,而不是端部支撑横隔板,荷载作用位置为局部模型中的荷位。

### 2.5.2 预应力模型分析

为分析施加预应力与桥面铺装受力的关系,首先通过计算得出无预应力模型的最大应力、应变的位置,然后分析分别在纵向-100、-60、-40、40、60、100 MPa 预应力和横向-100、-60、-40、40、60、100 MPa 预应力下相同位置应力和应变的变化。

图 5 为施加纵向预应力后各向正应力提高的百分比。

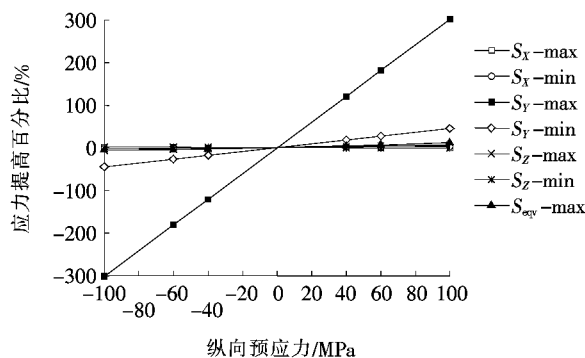


图 5 纵向预应力施加后各向应力提高百分比

由图 5 可见:纵向预应力对纵向应力的影响最为明显,纵向预压力为 100 MPa 时使纵向拉应力减小 300%,纵向压应力减小 45%;纵向预拉应力为 100 MPa 时使纵向拉应力提高 300%,纵向压应力提高 45%。纵向预压应力越大,桥面铺装内纵向压应力和纵向拉应力越小,拉应力变为压应力;纵向预拉应力越大,桥面铺装内纵向压应力和纵向拉应力越大。

图 6 为施加纵向预应力对应变影响的百分比。

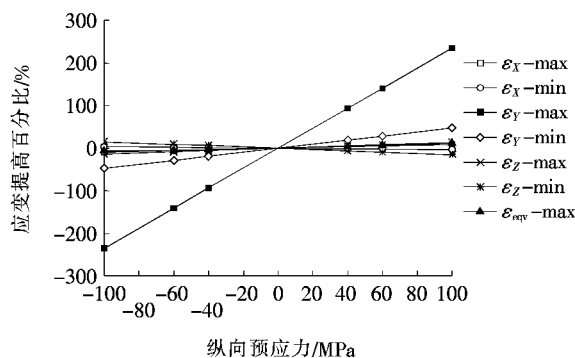


图 6 纵向预应力对应变影响的百分比

由图 6 可以看出:纵向预应力对纵向应变的影响与对纵向应力的影响类似,纵向预压力为 100 MPa 时使纵向拉应变减小 237%,纵向压应变减小 47%;纵向预拉应力为 100 MPa 时使纵向拉应变提高 237%,纵向压应变提高 47%。纵向预压应力越大,桥面铺装内纵向压应变和纵向拉应变越小,拉应变变为压应变;纵

向预拉应力越大,桥面铺装内纵向压应变和纵向拉应变越大,纵向预应力对横向和竖向应力应变影响不大。

图 7 为横向预应力对正应力影响的百分比。

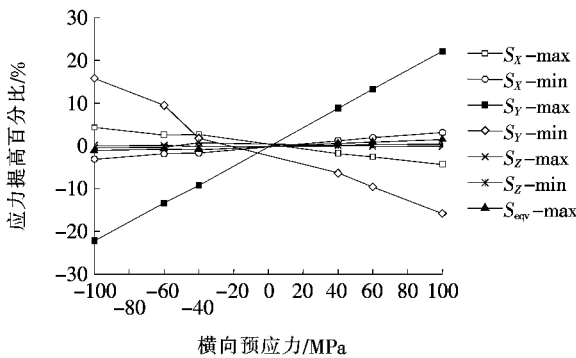


图 7 横向预应力对应力影响的百分比

由图 7 可以看出：

(1) 横向预应力对纵向应力的影响也较为明显，横向预压力为 100 MPa 时使纵向拉应力减小 22%，纵向压应力增加 16%；横向预拉应力为 100 MPa 时使纵向拉应力提高 22%，纵向压应力减小 16%。横向预压应力越大，桥面铺装内纵向拉应力越小而纵向压应力越大；横向预拉应力越大，桥面铺装内纵向拉应力越大而纵向压应力越小。

(2) 横向预应力对横向应力的影响不太明显，横向预压力为 100 MPa 时使横向拉应力增大 4%，横向压应力减小 3%；横向预拉应力为 100 MPa 时使横向拉应力减小 4%，横向压应力增大 3%。横向预压应力越大，桥面铺装内横向拉应力越大而横向压应力越小；横向预拉应力越大，桥面铺装内横向拉应力越小而横向压应力越大。

图 8 为施加横向预应力对应变的影响百分比。

由图 8 可知：

(1) 横向预应力对纵向应变的影响也较为明显，横向预压力为 100 MPa 时使纵向拉应变增大 21%，纵

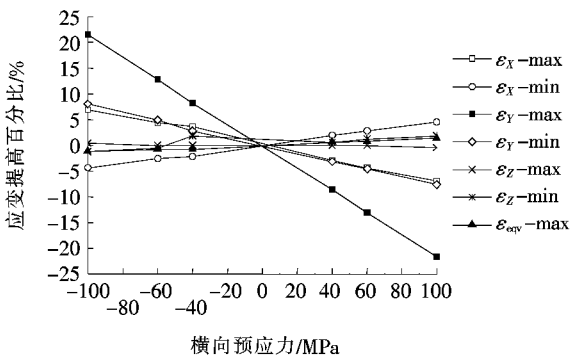


图 8 横向预应力对应变影响的百分比

向压应变增加 8%；横向预拉应力为 100 MPa 时使纵向拉应变降低 21%，纵向压应变减小 8%。横向预压应力越大，桥面铺装内纵向拉应变和纵向压应变越大；横向预拉应力越大，桥面铺装内纵向拉应变和纵向压应变越小。

(2) 横向预应力对横向应变的影响不太明显，横向预压力为 100 MPa 时使横向拉应变增大 7%，横向压应变减小 5%；横向预拉应力为 100 MPa 时使横向拉应变减小 7%，横向压应变增大 5%。横向预压应力越大，桥面铺装内横向拉应变越大而横向压应变越小；横向预拉应力越大，桥面铺装内横向拉应变越小而横向压应变越大。横向预应力对竖向应力应变的影响不大。

### 3 模型比较

在正交异性钢桥面板结构形式、桥面铺装厚度和材料参数相同的情况下，将采用整体模型、局部简化模型、预应力局部简化模型、混合单元模型、子模型等方法得到的桥面铺装层内最大应力和应变相比较，见表 1、2，表中预应力模型的结果为施加纵向 100 MPa 预拉应力的结果。

表 1 各模型应力、应变结果

模型	横向				竖向				纵向				等效应力/ kPa	等效应变/ με
	最大应力/kPa	最大应变/με	最小应力/kPa	最小应变/με	最大应力/kPa	最大应变/με	最小应力/kPa	最小应变/με	最大应力/kPa	最大应变/με	最小应力/kPa	最小应变/με		
整体模型	794	823	-918	-613	85	231	-981	-863	66	38	-834	-534	879	897
混合单元模型	767	797	-937	-632	76	235	-982	-860	5	6	-835	-531	855	873
局部模型	251	251	-697	-501	70	160	-702	-629	54	56	-530	-300	528	568
子模型	771	789	-938	-644	70	224	-981	-870	33	31	-778	-474	823	842
预应力模型	276	301	-549	-450	167	246	-186	-140	213	183	-563	-422	569	577

表 2 各模型应力应变与整体模型比较的误差

%

模型	横向最 大应力	横向最 大应变	横向最 小应力	横向最 小应变	竖向最 大应力	竖向最 大应变	竖向最 小应力	竖向最 小应变	纵向最 大应力	纵向最 大应变	纵向最 小应力	纵向最 小应变	等效 应力	等效 应变
混合单元模型	-3	-3	2	3	-10	2	0	0	-93	-83	0	-1	-3	-3
局部模型	-68	-70	-24	-18	-18	-31	-28	-27	-17	49	-36	-44	-40	-37
子模型	-3	-4	2	5	-18	-3	0	1	-50	-16	-7	-11	-6	-6
预应力模型	-97	-63	-40	-27	96	6	-81	-84	225	387	-33	-21	-35	-36

从表 2 可以看出:与整体模型相比,混合单元模型、子模型方法各向应力、应变误差最小,是精确度较高的方法。但混合单元模型与整体模型相比纵向应力与应变误差较大,这是因为简支梁整体模型中纵向最大应力和纵向最大应变的位置靠近梁端,而混合单元模型跨中 24 m 为实体模型,无法得到端部的结果,因此得到的纵向应力应变与整体模型无可比性。除纵向应力应变外,混合单元模型与整体模型相比各向应力、应变误差最小。

#### 4 结论

在钢桥面板和铺装材料参数相同的基础上,采用不同方法建立有限元模型,对每一种有限元模型所得桥面铺装内部的应力应变结果进行了分析。得到以下结论:

(1) 预应力模型的结果为纵向预压应力越大,桥面铺装内纵向压应力、压应变和纵向拉应力、拉应变越小,拉应力、拉应变变为压应力、压应变;纵向预拉应力越大,桥面铺装内纵向压应力、压应变和纵向拉应力、拉应变越大。横向预压应力越大,桥面铺装内纵向拉应力越小而纵向压应力越大;横向预拉应力越大,桥面铺装内纵向拉应力越大而纵向压应力越小。横向预压应力越大,桥面铺装内纵向拉应变和纵向压应变越大;横向预拉应力越大,桥面铺装内纵向拉应变和纵向压应变越小。纵向预应力对横向和竖向应力应变影响不大,横向预应力对竖向应力应变的影响不大。

(2) 对简支梁桥整体模型、局部简化模型、预应力局部简化模型、混合单元模型、子模型 5 种有限元模型

的计算结果进行比较发现:混合单元模型最接近于整体模型。

#### 参考文献:

- [1] 多田宏行.桥面铺装的设计与施工[M].日本:鹿岛出版会,1993.
- [2] 黄晓明,王捷,陈仕周.大跨钢桥桥面铺装结构受力分析[J].土木工程学报,1999(1).
- [3] G. H. Günther, S. Bild, G. Sedlacek. Durability of Asphaltic Pavements on Orthotropic Decks of Steel Bridges [J].Journal of Constructional Steel Research,1987,7(2): 85-106.
- [4] 苏庆田,吴冲,董冰.斜拉桥扁平钢箱梁的有限混合单元法分析[J].同济大学学报:自然科学版,2005(6).
- [5] Yang YU.Multi-Scale Modelling of Long-Span Bridges for Health Assessment in Structural Health Monitoring [D].The Hong Kong Polytechnic University,2012.
- [6] F Y.Wang, Y L Xu, W L Qu.Mixed-Dimensional Finite Element Coupling for Structural Multi-Scale Simulation [J].Finite Elements in Analysis and Design, 2014, 92 (24):12-25.
- [7] 聂建国,周萌,姬同庚,等.基于多尺度模型的自锚式钢箱梁悬索桥主缆锚固区受力性能研究[J].土木工程学报, 2014(6).
- [8] 钟儒勉,宗周红,秦中远,等.基于多尺度模型修正的结合梁斜拉桥损伤识别方法[J].东南大学学报:自然科学版, 2014(2).
- [9] 徐伟,李智,张肖宁.子模型法在大跨径斜拉桥桥面结构分析中的应用[J].土木工程学报,2004(6).
- [10] 林广平.基于断裂力学的钢桥面铺装层疲劳寿命研究 [D].东南大学博士学位论文,2005.