

# 混凝土桥水泥混凝土铺装荷载应力

王 虎<sup>1</sup>, 徐勤武<sup>2</sup>

(1. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了研究混凝土桥混凝土铺装层病害机理,用有限元法分析不同桥型在车辆荷载作用下水泥铺装层的不同受力特征;着重分析了铺装层拉应力、接触层间剪应力及层间法向分离拉应力。针对典型箱梁,分析了铺装层和桥面板间完全连续、完全光滑和滑动摩擦 3 种不同接触类型;连续铺装和划缝、带裂缝配筋工作状态;分析应力对铺装厚度的敏感性。结果表明,水泥铺装应以铺装层上表面抗拉强度、层间抗剪强度和法向分离强度作为设计指标,不同桥梁采用不同的铺装厚度。

**关键词:**道路工程;水泥混凝土铺装;桥型;裂缝;厚度敏感性分析;荷载应力

**中图分类号:**U416.216

**文献标识码:**A

## Load stress in concrete pavement on concrete bridges

WANG Hu<sup>1</sup>, XU Qin-wu<sup>2</sup>

(1. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** For researching the damage of concrete pavement on concrete bridges, the mechanistic performance of bridge overlay under vehicles was analyzed with FEA. The tensile stress, interface shear stress and interface normal pulling stress were computed. With an example of a typical box beam, the pavement responses was analyzed when the interface was bonded or frictionally sliding; the pavement stress sensitivity to the pavement thickness was researched. The results show that surface anti-tensile strength, interface anti-shear strength and normal separate strength are three important indices for designing of concrete pavement, different bridges should have different pavement thickness. 8 tabs, 15 figs, 6 refs.

**Key words:** road engineering; concrete pavement; bridge type; cracks; sensitivity to depth; load stress

## 0 引 言

水泥混凝土桥水泥铺装层在桥面连续部位、连续梁支点及负弯矩、箱梁腹板顶部等特征部位容易产生拉应力破坏;在划缝铺装的板角、板边出现开裂和脆裂;层间粘结受损和空鼓破坏等。文献[1]按照线

弹性理论,用平面解析法对连续梁支点、简支梁连续桥面和肋板部位的水泥铺装层弯曲拉应力进行了研究。本文采用有限元分析不同桥型承受汽超-20作用下水泥铺装层的不同受力特征,着重分析了铺装层拉应力、接触层间剪应力及层间法向分离拉拔力。通过有限元空间实体建模和计算,将桥梁体和

铺装层视为 1 个相互作用的统一整体,计算得出不同桥型铺装层的典型受力特征和规律,并给出建议铺装设计厚度。

## 1 有限元分析模型

基本假设:①桥梁梁体处于无裂缝工作状态;②材料线弹性;③假设铺装层与桥面板间完全连续接触;④铺装层和桥梁主体共同承受汽车荷载作用。

按照桥梁截面不同形式分类的方法,选取实心板桥、空心板桥、T 形梁桥和箱形梁桥,实桥尺寸见表 1。桥梁体、铺装层和支座采用空间 8 节点实体单元模拟;钢筋网等效为连续薄板,采用壳单元模拟。边界条件为橡胶支座支撑下的简支梁和连续梁,不考虑桥梁下部结构变形影响。经比较分析,车轮域网格密度最密划分至  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ ,而连续梁远离负弯矩区划分至  $100\text{ cm}$ ,单元数最多 80 444 个,节点数 101 420(连续 4 跨 T 梁 8 cm 铺装),模型见图 1、图 2、图 3。铺装层和桥面板在完全连续和光滑接触时采用耦合处理(完全连续时上下对应节点各自由度位移一致,光滑时法向一致无分离、其他方向自由)。

表 1 不同桥型尺寸

桥梁形式	实心板/m	空心板/m	T 形梁/m	箱梁/m
横向连接/m	整体式宽 8	9 片梁宽 11.25	5 片梁宽 13.5	单箱单室宽 8; 连续梁宽 8.5
跨径/m	3 跨 $16 \times 3$	简支 1 跨 20	4 跨 $30 \times 4$	4 跨 $20 \times 4$
(顶)板厚/m	0.6	0.8	变截面 0.08~0.20	变截面 0.12~0.23
肋板高/宽/m			1.5 / 0.18	1.2 / 0.3

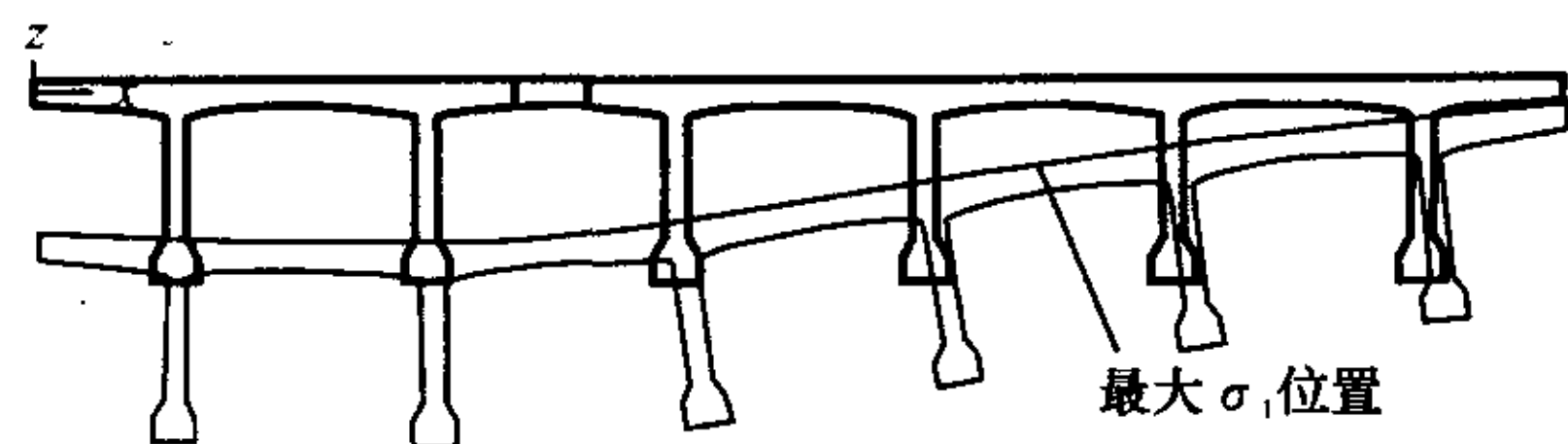


图 1 T 梁跨中横截面变形示意图

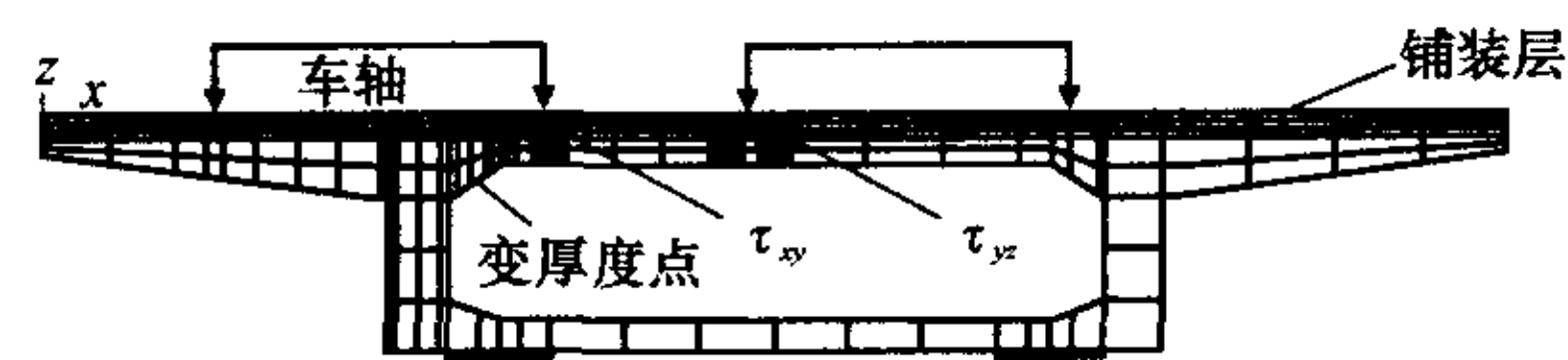


图 2 箱梁模型支座处横截面



图 3 空心板桥横截面模型图

## 2 荷载及基本参数确定

(1) 采用汽超-20 双车队单向并排行驶,对于简支梁,根据文献[2],确定按照横向偏载和纵向使跨中弯矩最大的组合布载。对于连续梁,横向偏载,纵向使中跨支点产生最大负弯矩。

(2) 根据文献[3],轮胎接地面  $A = 0.008P + 152$  ( $A$  为接地面积,  $P$  为轴重),由接地压强  $p = P/A$  确定  $A$  和  $p$ ;14 t 重轴车轮接地形式确定为:单轮宽 18 cm,轮隙 10 cm,接地长 24 cm。荷载组合根据文献[2],取汽超-20+制动力+冲击力,制动力对于连续梁取一列车队的 10%,对于简支梁由于刚好布置 2 veh 并排重车,为考虑局部效应,根据文献[2]假定 1 veh 重车突然紧急制动,取制动系数 0.5。

(3) 桥梁体模量取 30 000 MPa,水泥铺装 33 000 MPa,水泥垫层 28 500 MPa,泊松比均取 0.166 67,钢筋模量 210 000 MPa。

(4)  $\sigma_1$  为水泥混凝土铺装层最大拉应力(第一主应力); $\tau_{xy}$  为接触层间横桥向剪应力; $\tau_{yx}$  为接触层间顺桥向剪应力; $\sigma_y$  为接触层间法向分离拉应力。

## 3 不同桥型铺装层受力特性

### 3.1 最大受力位置

由跨中区域分析知,简支梁受力相对连续梁更不利。 $\sigma_1$  最大值在铺装层顶,对 T 梁、箱梁由于桥面板横向变形大,横桥向拉应力大于顺桥向,T 形梁  $\sigma_1$  在 2 片梁相接对应铺装顶,箱形梁  $\sigma_1$  在顶板和肋板相接梗翼桥面板变厚度处(图 1、图 2)。空心板铺装层间  $\sigma_y$ 、铺顶  $\sigma_1$  在接缝位置出现峰值,然后向两侧急剧减小(图 3、图 4)。层间  $\tau_{yx}$  最大值在重车后轴 14 t 车轮底靠前, $\tau_{xy}$  最大值在车轮横向边缘,向外侧迅速衰减,局部效应明显(图 5)。

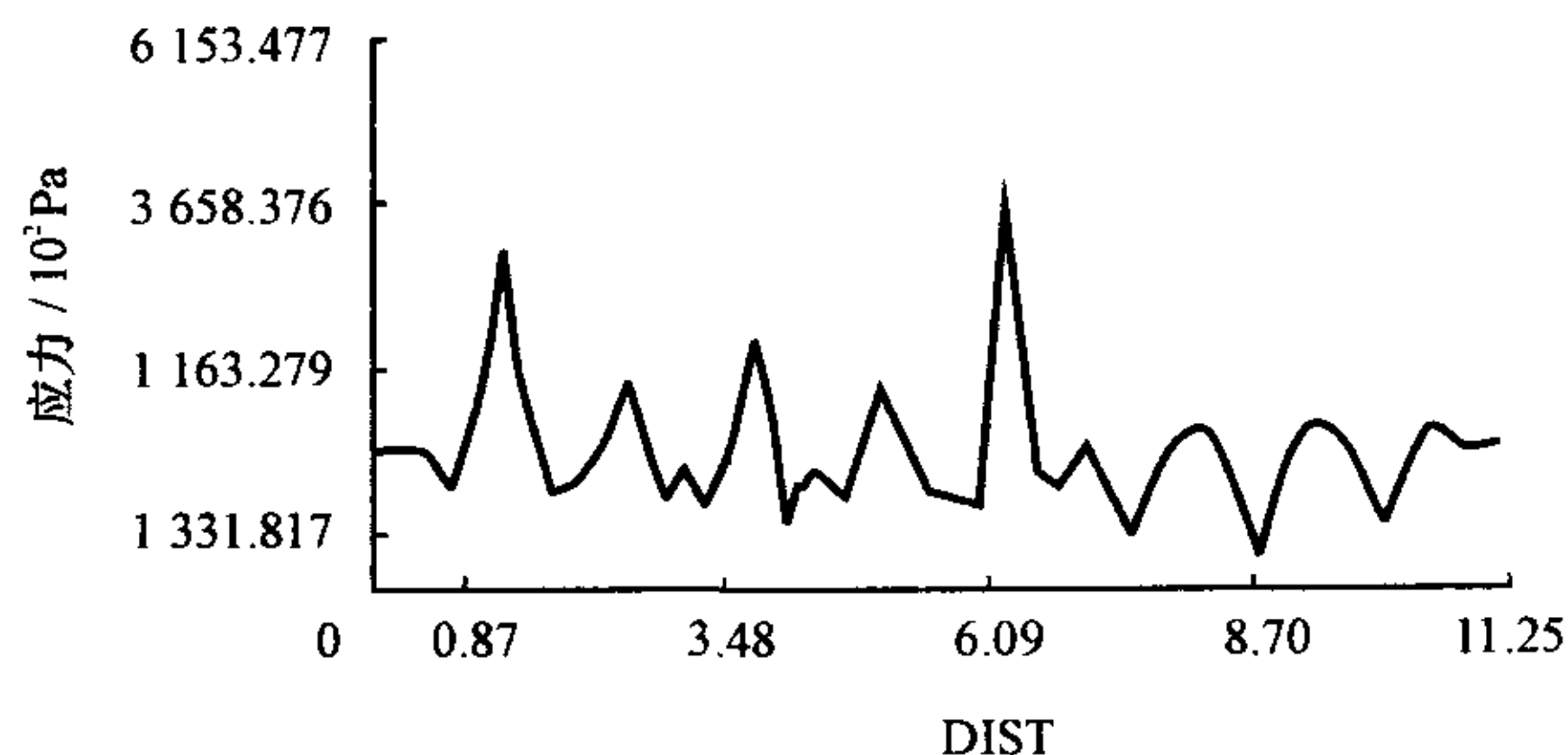


图 4 简支空心板跨中横截面铺装层顶拉应力横向路径图

### 3.2 应力对铺装厚度敏感性分析

(1) 计算结果表明,铺装特殊部横向拉应力大于纵向,最大铺装拉应力和桥梁横向稳定性有密切关系。T 梁横向变形最大,空心板在接缝薄弱处受力



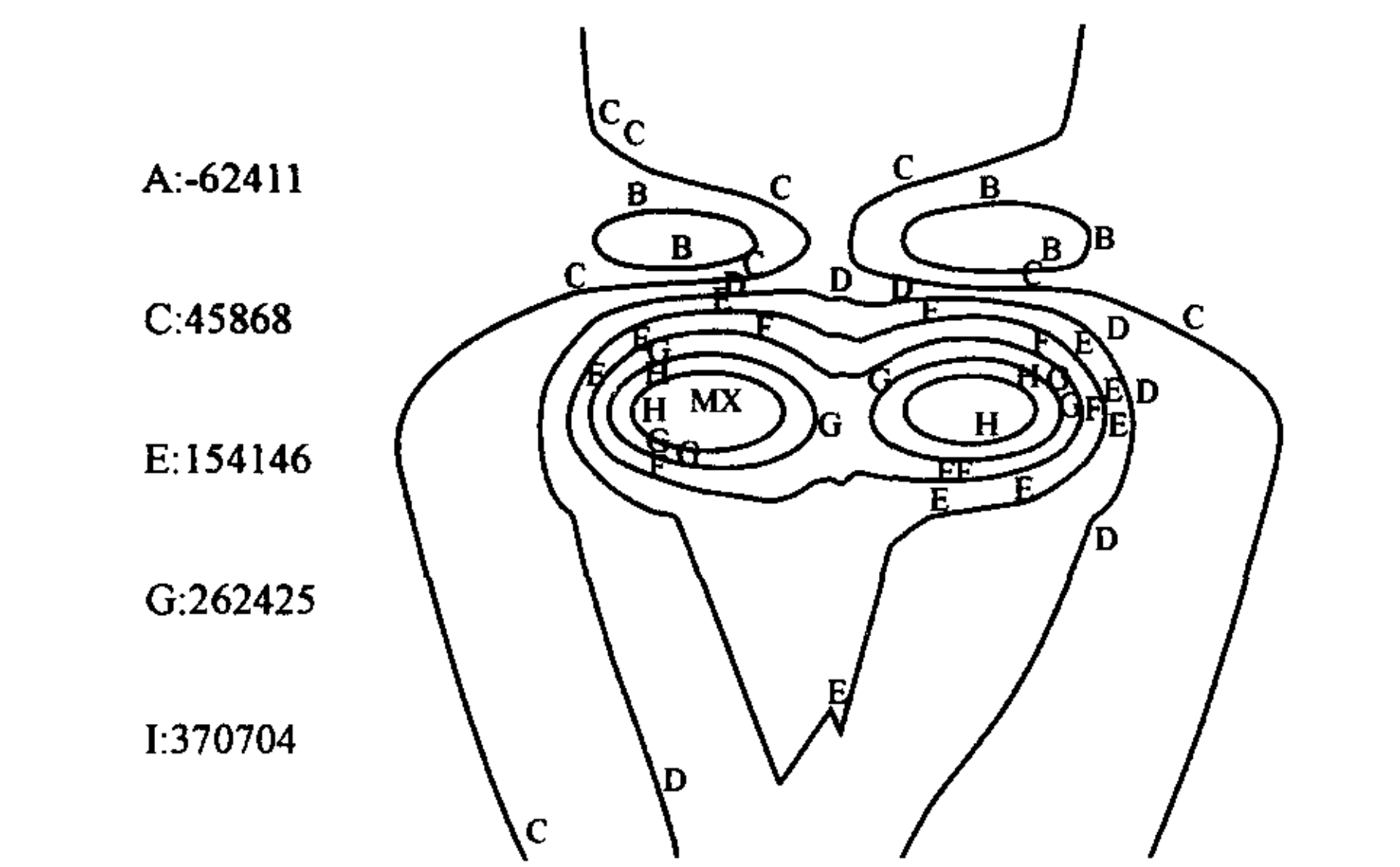


图 5 空心板 8 cm 铺装层间  $\tau_{yz}$  等值线

不利,实心板稳定性最好。 $\sigma_1$  随铺装层厚度增加而衰减,且趋势逐渐减弱(表 2)。实心板在 8 cm、空心板 12 cm、T 梁和箱梁 14 cm 后衰减趋势较平缓(图 6)。

(2) 空心板层间法向分离拉应力  $\sigma_y$  明显高于其他桥型,且随铺装厚度增加呈现反拱现象,在 10 cm 厚达到最大;其他桥型随着厚度增加, $\sigma_y$  衰减幅度很大,且趋势减弱(表 3)。实心板在铺装厚 6 cm、空心板 10 cm、T 梁 14 cm 后衰减趋势较平缓,箱梁 16 cm 后基本不再变化(图 7)。

表 2 铺装厚从 2 cm 增加到 12 cm 时  $\sigma_1$  衰减幅度

参 数	实心板	空心板	T 梁	箱梁
衰减最大幅度/(MPa · 2 cm <sup>-1</sup> )	0.034 9	0.106 2	0.375 0	0.441 7
衰减最小幅度的/(MPa · 2 cm <sup>-1</sup> )	0.023 2	0.065 3	0.181 0	0.259 6
平均衰减/(MPa · 2 cm <sup>-1</sup> )	0.028 8	0.076 3	0.281 5	0.359 2

表 3 铺装厚从 2 cm 增加到 12 cm 时  $\sigma_y$  衰减幅度

参 数	实心板	T 梁	箱梁
衰减最大幅度/(MPa · 2 cm <sup>-1</sup> )	0.015	0.054	0.035 4
衰减最小幅度的/(MPa · 2 cm <sup>-1</sup> )	0.006	0.036	0.015 7
平均衰减/(MPa · 2 cm <sup>-1</sup> )	0.012	0.049	0.020 6
衰减百分比/%	46.05	39.74	50.00

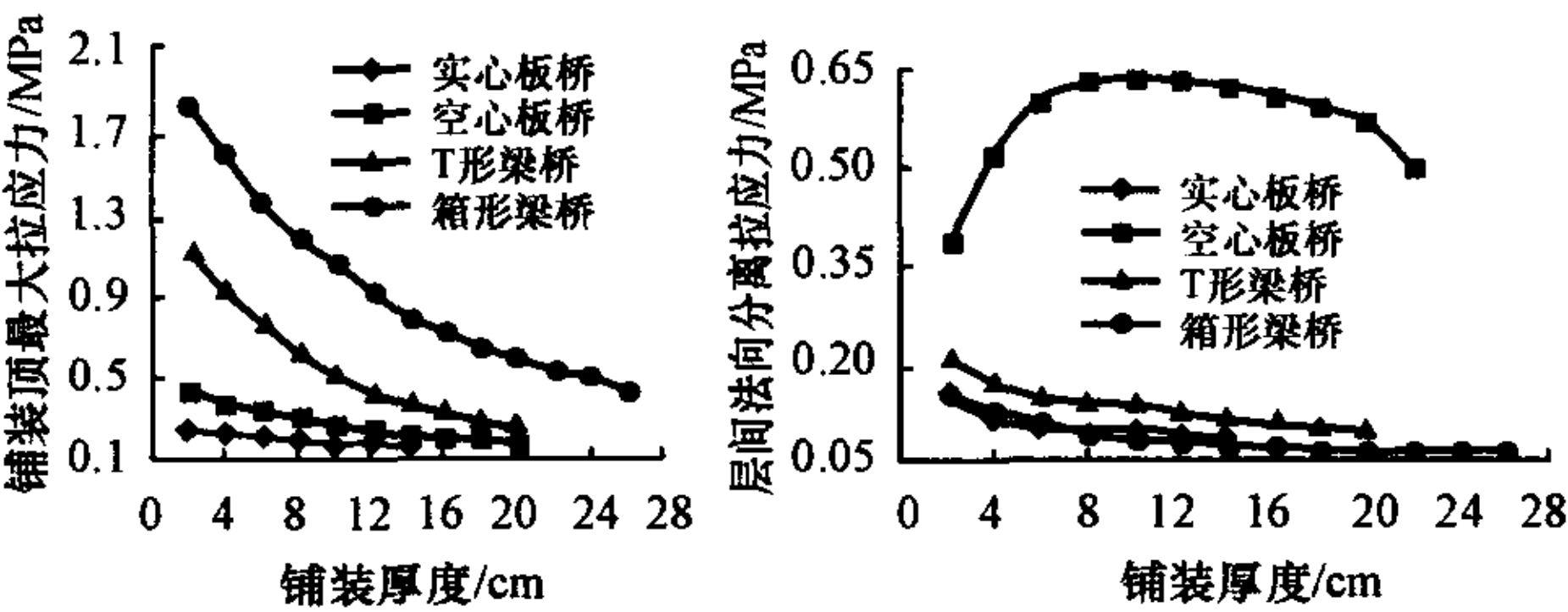


图 6 铺装顶  $\sigma_1$  与铺装厚度关系 图 7 层间  $\sigma$  与铺装厚度关系

(3) 随着铺装层厚度增加,层间横桥向剪应力  $\tau_{xy}$  先增大后衰减,在 4 cm 或 6 cm 时达到最大,衰减趋势逐渐减弱,铺装厚 14 cm,相对 4 cm, $\tau_{xy}$  对实心板、空心板、T 梁、箱梁分别降低: 14.80%、

33.04%、46.91%、19.78%,增加铺装厚度对于降低  $\tau_{xy}$  效果明显。 $\tau_{xy}$  对铺装厚度敏感性为 T 梁>空心板>箱梁>实心板,表明横向稳定性差的桥梁通过增加铺装厚度厚越能有效降低  $\tau_{xy}$  (图 8)。

(4) 空心板层间顺桥向剪应力  $\tau_{yz}$  随铺装厚度增加,呈现反拱现象,在 4 cm 厚达到最大;对于其他桥型, $\tau_{yz}$  随着厚度增加而降低,且降低趋势逐渐减弱(图 9)。对于实心板桥, $\tau_{yz} > \tau_{xy}$ ,而另外 3 种桥梁  $\tau_{yz} < \tau_{xy}$ ,因为实心板桥相对横向稳定性更好。

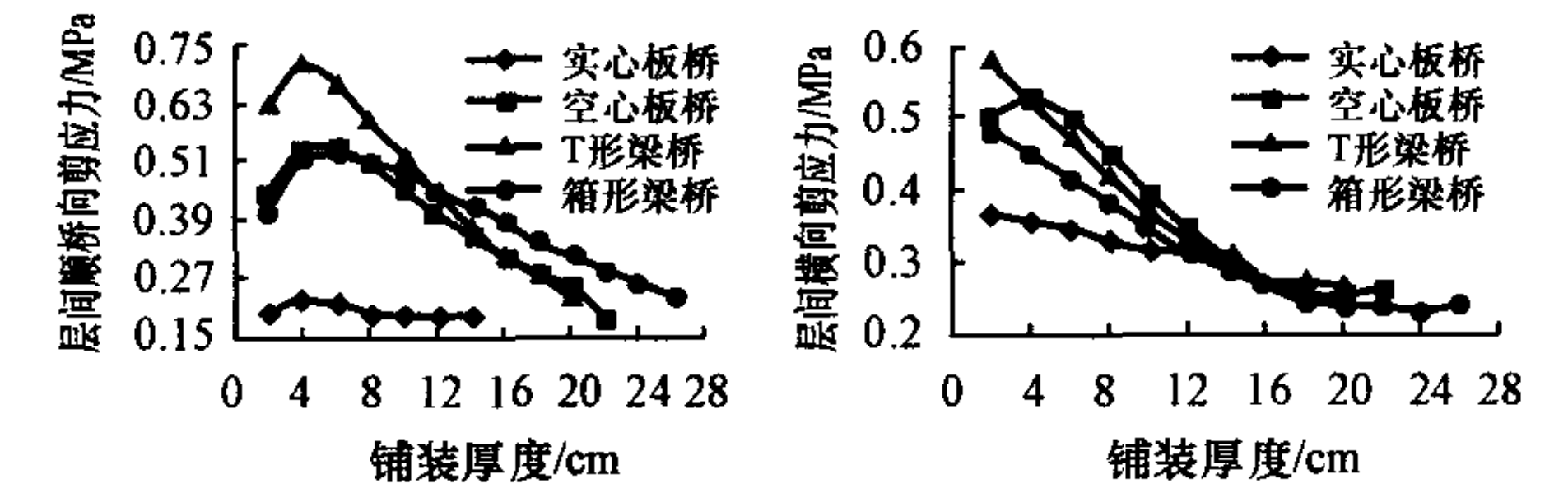


图 8 层间  $\tau_{xy}$  与铺装厚度关系 图 9 层间  $\tau_{yz}$  与铺装厚度关系

3.3 铺装设计厚度

通过分析可知,简支梁跨中及附近区域层间受力相对于连续梁负弯矩区域更不利,在完全连续接触时,铺装层间受力最大;箱型梁桥特殊部位铺装拉应力最不利,空心板桥层间法向分离拉应力最大,T 型梁和箱梁层间剪应力较大。而水泥铺装破坏形式主要包括特殊部位拉应力破坏、层间剪切破坏和起皮脱空等。层间剪应力和拉应力设计指标可以基于简支梁层间连续接触条件。T 型梁和箱型梁铺装应力和铺装厚度之间有更好的相关性,在简支梁层间完全连续接触的情况下,应力-铺装厚度关系回归公式见表 4、表 5。基于计算和应力-厚度变化规律,建议设计厚度:实心板桥为 8~10 cm,空心板桥为 10~14 cm,T 梁、箱梁为 10~16 cm。

表 4 T 梁铺装应力与厚度关系(R 为相关系数)

简支 T 梁	$\sigma_1 = 0.005 5h^2 - 0.217 5h + 2.672 8, R^2 = 0.999 5$ $\sigma_y = -0.049 3\ln h + 0.243 7, R^2 = 0.988 7$ $\tau_{xy} = -1.864 h^4 - 0.027 7h^2 + 0.162 7h + 0.399, R^2 = 0.997 7$
连续 T 梁	$\sigma_1 = 0.003 1h^2 - 0.129 5h + 3.014 2, R^2 = 0.997 8$

4 铺装层带裂缝工作状态

下面以 20 m 跨径简支梁箱梁 10 cm 铺装为对象,层间完全连续接触,分析铺装带裂缝工作时汽车荷载应力。

4.1 铺装层带裂缝工作时应力分析

如图 10 所示,假设铺装划分纵向 3 道、横向 4 道

表 5 箱梁铺装应力与厚度关系(R 为相关系数)

简支箱梁	$\sigma_1 = 0.004\ 7h^2 - 0.241\ 3h + 4.099\ 5, R^2 = 0.998\ 3$
	$\sigma_y = -0.036\ 4\ln h + 0.172\ 9, R^2 = 0.972\ 6$
	$\tau_{xy} = 3.906\ 8h^4 + 0.000\ 5h^3 - 0.011\ 9h^2 + 0.100\ 6h + 0.253\ 7$ $R^2 = 0.994\ 2$
连续箱梁	$\sigma_1 = 0.001\ 5h^2 - 0.084\ 1h + 2.609\ 4, R^2 = 0.997\ 5$

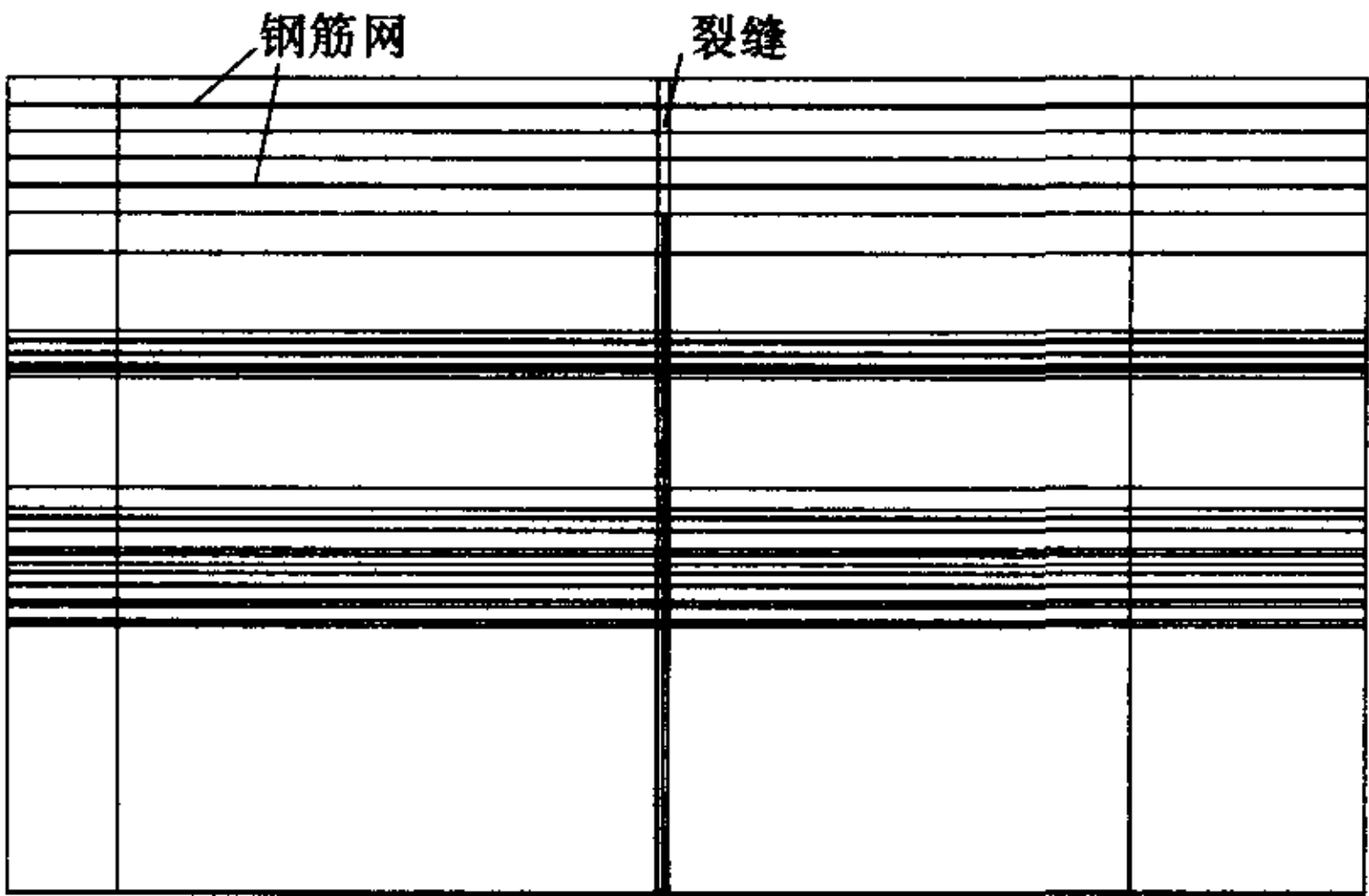


图 10 铺装层带裂缝模型(箱梁)

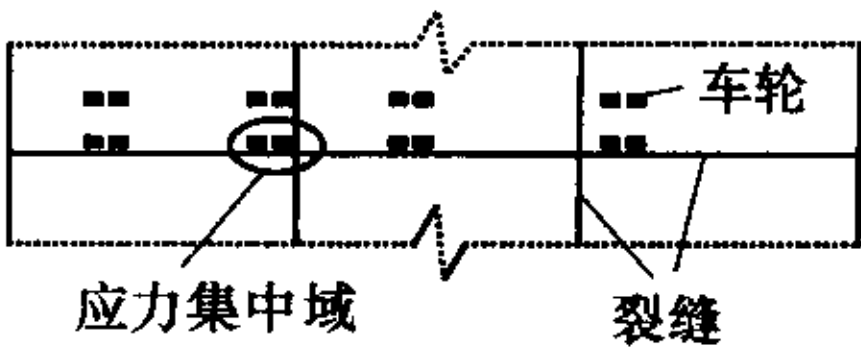


图 11 铺装层带裂缝汽车布置

施工缝,在外界荷载作用下沿施工缝完全断开,形成宽 5 mm 深 10 cm 的 3 纵 4 横裂缝(图 10),荷载布置见图 11,一重轮作用在跨中板角。

从表 6 计算结果看出,相对无缝工作应力值明显增大,主要在板角和铺装底裂缝边缘产生过大集中应力。当层间结合不牢时,抗拉强度 0.5 MPa,结合好时 1.0 MPa,所以划缝工作状态很容易在板角和裂缝边缘造成脱空滑移<sup>[4]</sup>。

4.2 配筋分析

当铺装层处于无裂缝工作状态,配筋对铺装层受力基本没有改善作用;但是当铺装层出现裂缝后,配筋将产生显著作用。从表 5 计算看出,加设  $\Phi 8$  上层钢筋和下层钢筋对铺装顶受力改善甚微,但对铺装底  $\sigma_1$ 、 $\tau_{\max}$ 、 $\sigma_e$  和层间  $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$  有显著改善作用;上层钢筋还能显著降低层间  $\sigma_y$ ;双层钢筋相对单层钢筋在降低铺装底  $\sigma_1$  和层间  $\tau_{xy}$ 、 $\tau_{yz}$  明显有利。铺装应力随着钢筋网间距增大而增大,但增大趋势逐渐衰减(图 12)。

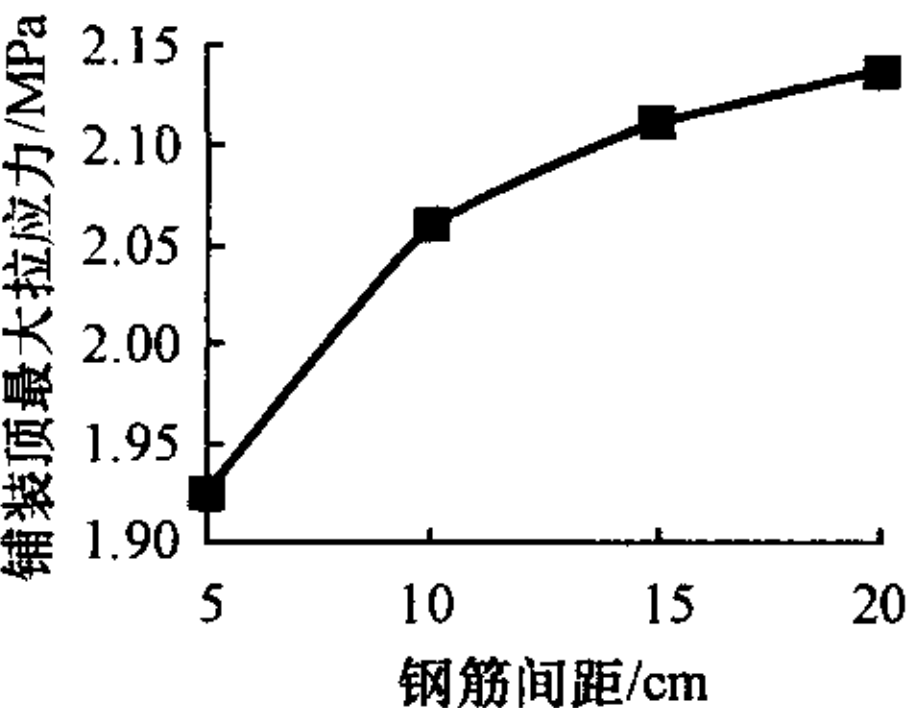


图 12 铺装拉应力  $\sigma_1$  和双层钢筋网间距关系折线图

对于钢筋本身来说,上层钢筋受到的拉应力远大于下层钢筋,同样随着钢筋间距的增大而增大,但均远没有达到钢筋抗拉强度。钢筋最大拉应力和钢筋网间距接近线性关系(表 7)。

表 6 铺装层带裂缝工作状态下受力 / MPa

参数	无缝工作	带缝工作	加上层钢筋 15×15Φ8	加下层钢筋 15×15Φ8	加双层钢筋 15×15Φ8
铺顶 $\sigma_1$	2.140 5	2.236 8	2.128 4	2.212 2	2.110 8
铺顶 $\tau_{\max}$	3.466 4	3.556 5	3.513 0	3.602 0	3.485 9
铺顶 $\sigma_e$	3.045 5	3.103 4	3.056 7	3.126 5	3.034 7
铺底 $\sigma_1$	0.944 5	1.571 6	0.940 8	1.193 9	0.917 1
铺底 $\sigma_3$	-1.991 6	-11.085 0	-6.458 1	-7.406 7	-5.216 9
铺底 $\tau_{\max}$	1.185 9	4.446 9	2.780 4	2.721 6	2.457 0
铺底 $\sigma_e$	2.118 7	8.733 3	5.443 1	4.914 0	3.322 0
层间 $\sigma_y$	0.118 5	0.982 3	0.459 0	0.888 6	0.440 5
层间 $\tau_{xy}$	0.484 4	0.968 9	0.500 0	0.515 6	0.496 1
层间 $\tau_{yz}$	0.347 8	3.029 4	1.867 0	1.658 8	1.175 8

表 7 双层配筋时钢筋拉应力 / MPa

钢筋拉力	20×20Φ8	15×15Φ8	10×10Φ8	5×5Φ8
上层钢筋	78.352	63.487	46.528	26.359
下层钢筋	39.588	32.253	23.526	12.911

5 层间接触分析

铺装层和桥面板间实际上不可能处于完全连续接触状态,而是存在一定的相对滑移。计算表明不设横隔板的简支 T 型梁铺装层最大拉应力出现在翼缘板交接处,当设置横隔板时增强了横向稳定向,在肋板顶对应铺装产生拉应力也很大。下文建立桥面板和铺装体系的简化模型,分析 T 梁肋板处铺装拉应力(完全连续和完全光滑接触);同时分析箱梁铺装层在滑动摩擦接触时的层间受力<sup>[5]</sup>。

5.1 设置横隔板的 T 梁肋板顶铺装层拉应力

T 梁在肋板顶铺装层会产生较大横向拉应力而导致铺装顶纵向裂缝。设 T 梁 30 m 一跨中间设有 3 道横隔板,根据行车道板理论取两相邻横隔板和肋板中长 7.5 m、宽 2.2 m 的行车道板小模型四边固结(图 13),计算比较确定在 1/4 长度位置布置并排双车中的 4 个 7 t 重轮(纵向相隔 1.4 m,横向 1.3 m)最不利。层间接触分别考虑完全光滑和完全连续两种接触状态。肋板处铺装顶拉应力  $\sigma_1$  随铺装厚度变化规律如图 14。在连续接触时从 2 cm 到 12 cm,  $\sigma_1$  减小 49.54%;从 12 cm 到 22 cm,  $\sigma_1$  减小 32.92%,可见铺装厚度影响很明显;在光滑接触时,  $\sigma_1$  先增大后减小,在 10 cm 铺装后达到最大。在铺装厚 7 cm 到 8 cm 间,完全连续和完全光滑产生的铺装层顶,  $\sigma_1$  相等,在此之前,连续大于光滑,在此之后,光滑大于连续。由于铺装厚一般 8 cm 或以



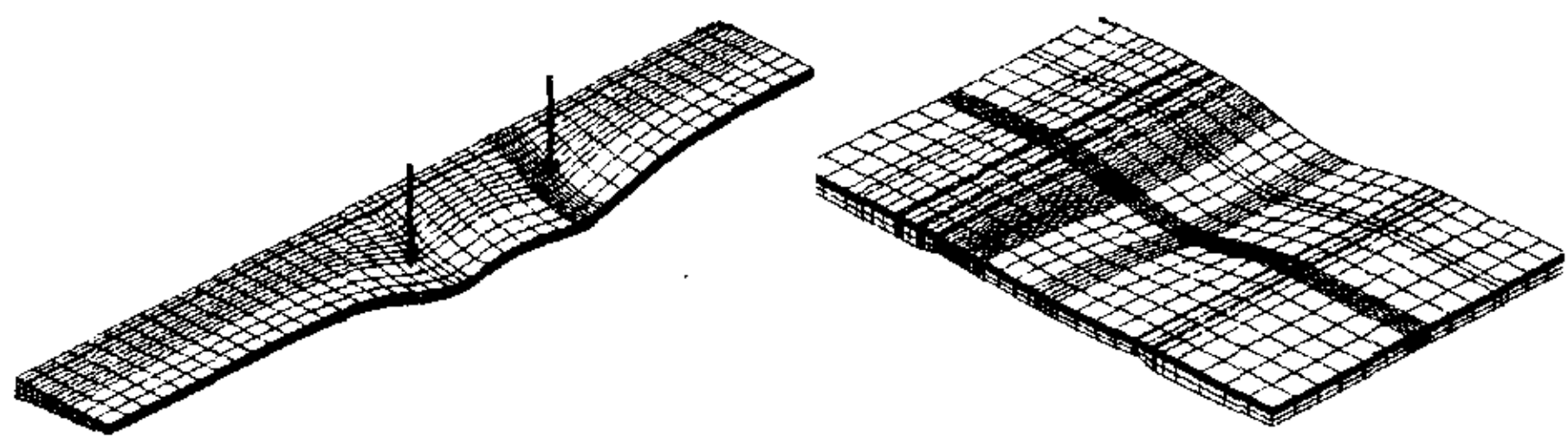


图 13 T 梁行车道板小模型

图 14 箱梁层间滑动接触分析小模型变形

(据对称取半幅)

上,所以要增强层间粘结性防止光滑产生<sup>[6]</sup>。

5.2 箱梁铺装和桥面板间滑动摩擦接触

假设接触层间法向没有分离、水平面内摩擦滑动。摩擦系数  $\mu$  取 0.1(相当于完全光滑);取 1.0(相当于完全连续)。截取 5 m 长的箱梁顶板单独分析,在肋板和顶板相接处固结,纵向两头拉住(图

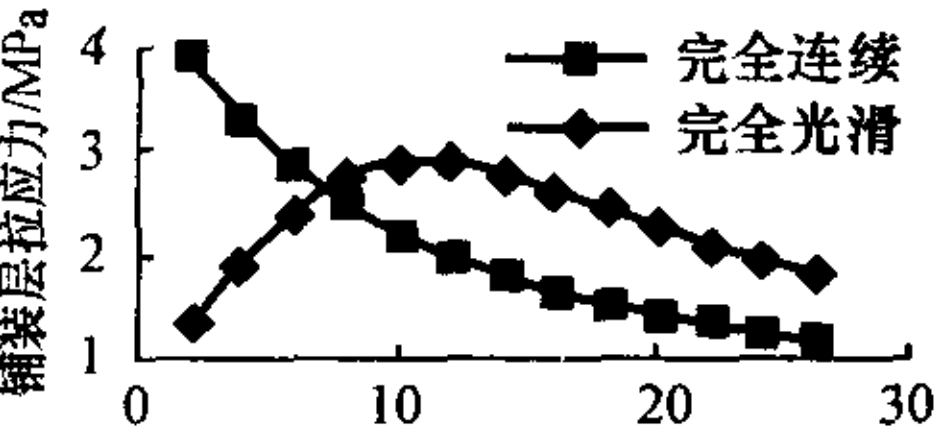


图 15 T 梁肋板顶铺装  $\sigma_1$  与铺装厚度关系

15)。偏载布置双车双轴(14 t)于纵向 1/2 处。和简支箱梁相比,铺装层顶拉应力降低 14.44%,层间横桥向剪应力增大 1.49%,顺桥

向剪应力降低 6.33%。由于主要考虑层间接触受力(尤其最大剪应力  $\tau_{xy}$ ),故认为小模型基本合理。计算表明,在完全连续接触时,层间摩擦力和铺装顶拉应力都达到最大值,但相对滑移最小(表 8)。

表 8 滑动摩擦接触计算结果

$\mu$	接触渗透/ $10^{-7}\text{m}$	层间压应力/MPa	摩擦力/MPa	相对滑移/ $10^{-6}\text{m}$
0.1	1.40	0.563 8	0.056 4	10.20
0.3	1.41	0.569 2	0.170 4	8.34
0.5	1.42	0.571 3	0.285 4	6.83
0.7	1.42	0.572 6	0.399 8	5.72
0.9	1.43	0.569 1	0.507 9	5.06
1.0	1.44	0.520 9	0.520 3	5.02

6 结 语

(1)空心板在接缝处对应铺装产生显著高于其他部位的横桥向拉应力、层间法向分离拉应力,是导致纵向裂缝、脱空起皮的位置;T 梁在翼缘板交接处和肋板顶产生很大横桥向拉应力,是产生纵向裂缝的主要部位;在交接处横桥向、顺桥向剪应力也都相对很大;箱梁在顶板变截面(肋板旁梗翼)对应铺装层也产生很大横桥向拉应力,要注意这些部位的加强处理措施。

(2)铺装层间横桥向剪应力主要由车轮作用产生桥面板边形引起,层间顺桥向剪应力由汽车制动力和桥面板纵向变形综合作用产生;层间剪应力局

部效应明显,除整体式实心板桥外,层间横桥向剪应力大于纵桥向剪应力。增大铺装厚度能显著降低层间法向分离拉应力,对层间有明显降低作用。

(3)连续梁负弯矩段产生的支座位置铺装层上表面主应力,在肋板顶铺装处出现明显高于两侧的应力,且呈峰状,剪力滞效应明显。

(4)铺装层划缝和带裂缝工作将在板角和裂缝边缘产生很大集中应力,加设钢筋网能显著改善受力状态。建议采用连续铺装,不推荐划缝处理。

(5)当层间接触为完全连续接触状态时,铺装层顶面拉应力和层间剪应力相对层间摩擦滑动状态时要大。对于肋板顶铺装拉应力,当铺装厚大于 8 cm 时,层间完全滑动时产生的拉应力大于完全连续状态,在此厚度之前连续大于光滑。

参考文献:

References:

[1] 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

WANG Hu,HU Chang-shun,WANG Bing-gang. The design and construction technology for concrete pavement on concrete bridges[R]. Xi'an:Chang'an University, 1999.

[2] JTJ 021-89. 公路桥涵设计通用规范[S]. 1989.

JTJ 021-89. Specifications for design of highway bridges and culverts[S]. 1989.

[3] 谭 权. 重载路面研究[D]. 西安:长安大学,2001.

TAN Quan. Study of heavy-load pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2001.

[4] 张敬珍,徐 岳,黄平明,等. 宽弯桥变形及控制[J]. 长安大学学报(自然科学版),2003,23(2):64-66.

ZHANG Jing-zhen,XU Yue,HUANG Ping-ming,et al. Displacement control of wide-curved bridges [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2003,23(2):64-66.

[5] 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 stel deck [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,4(2):10-13.

[6] 张占军,王 虎,胡长顺,等. 水泥混凝土桥面沥青铺装及防水层荷载弯曲应力分析[J]. 中国公路学报, 2004,17(4):37-40.

ZHANG Zhan-jun,WANG Hu,HU Chang-shun, et al. Analysis of the load bending stress of concrete bridge decks with asphalt pavement and waterproofing layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004,17(4):37-40.