

基于等强度原理的双层水泥混凝土路面设计

戴学臻

(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:针对现行《公路水泥混凝土路面设计规范》利用等刚度原理和几何推导的方法,对水泥混凝土双层板应力特性进行了分析。结果表明,在车辆荷载的作用下,无论上下层板的平面尺寸如何,接触点的上下板所承受应力和板厚、模量成比例关系。通过这一关系,基于等强度原则,可以得出双层板上下层的合理厚度范围。

关键词:道路工程;水泥混凝土路面;荷载应力;双层板

中图分类号:U416.01

文献标志码:A

文章编号:1674-0696(2010)02-185-03

Two-layer Cement Concrete Pavement Design Based on Equal Strength Theory

DAI Xue-zhen

(Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Education Ministry,
Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The paper analyses the characteristic of two-layer cement concrete slab. The research directed the current "Highway Cement Concrete Pavement Design Standards", and utilized Equal Strength Theory and geometric derivation method. The results show that under the vehicle load effect, the stress on the contact point is proportional to the thickness and modulus, in spite of the plane size of the upper and lower slab. The appropriate thickness range of the upper and lower slab can be drawn though this relationship and equal strength theory.

Key words: road engineering; cement concrete pavement; load stress; two-layer slab

对于双层板水泥混凝土路面结构进行详细的力学分析,提出合理的结构层厚度,无论是理论上还是实际需要都具有十分重要的意义。对此,国内不少专家进行了相关的研究,这些研究主要集中在面板底层应力计算^[1-3]、温度应力分布^[4-6]、传力杆布设^[7-8]以及轴载的科学换算^[9-10]。然而,很少探讨在荷载作用下双层板之间应力关系以及如何通过这种关系来确定合理的路面结构。

可视为双层水泥混凝土的路面有:路面工程中的复合式混凝土路面、旧混凝土路面上加罩普通或钢纤维混凝土面层^[11],以及水泥混凝土路面基层采用刚度较大的材料如水泥稳定碎石、贫混凝土、碾压混凝土等。

现行《公路水泥混凝土路面设计规范》^[12]中对双层水泥混凝土路面专门给出设计方法以及计算示例,但未对双层混凝土板应力分配进行分析,也没有指出在荷载作用下双层板上下层的合理厚度范围。笔者通过应力分析,指出在车辆荷载的作用下,接触点的上下板所承受应力关系,通过这一关系可以得

出双层板上下层的合理厚度范围。

1 力学模型的建立

水泥混凝土路面是多层结构,在进行荷载作用下的挠度和应力分析时,面层板和基层板被模型化为弹性地基上的双层弹性板。

这种理论把刚度大的水泥混凝土面层板和刚度较大的基层板看作是支承于弹性地基上的小挠度双层薄板。采用弹性地基板理论分析荷载应力时,面层和基层板作如下假设:

1) 面层板和基层板分别为具有弹性常数 E_1 、 E_2 (弹性模量) 和 μ_1 、 μ_2 (泊桑比) 的等厚弹性体。

2) 作用于面层板上的荷载,其施压面的最小边长或直径大于板厚时,可以近似地忽略竖向变形的影响,而利用薄板弯曲理论进行计算分析;而当施压面尺寸小于板厚时,需采用厚板理论计算,或依据厚板理论对薄板理论的计算结果进行修正。

3) 根据水泥混凝土路面的施工工艺,可以假定面层和基层间的接触面为完全光滑,即层间无摩擦。

力,可以相对滑移,接触面上的竖向位移和法向应力连续;同时,在荷载作用下,面板和基层板的接触保持完全连续,无脱空现象,面板的挠度即为基层板顶面的挠度。

在假设条件下,按照双层板理论进行应力分析时,双层板理论假设上下两层板的平面尺寸一致。工程实际中往往面层板与基层板的尺寸不一致。在这种情况下,不能简单地利用等刚度原理把上下两层板换算成一块板,从而不能用等刚度原理推导出上下两层板的应力关系。因此,本文将通过几何方法来推导。

2 双层板的应力分析

由单层板与双层板的力学对比分析(图1、图2)可知:二者的应力分析有其共同之处,相互之间可以建立联系,从而可以用单层水泥混凝土路面的计算方法确定双层水泥混凝土路面的荷载应力。

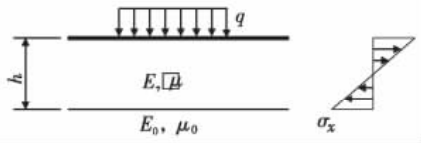


图1 单层板路面计算图

Fig.1 Single layer slab pavement calculation

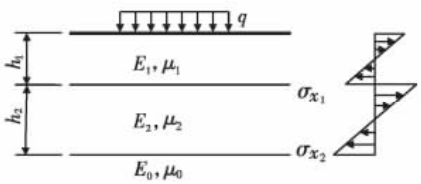


图2 分离式双层板计算图

Fig.2 Discrete two-layer slab board calculation

对于分离式双层板,由于假设其为弹性地基上上下层板之间以及基层板与地基之间都是绝对光滑接触的,因此,上下层板各自都有一个中和面。假定上下层板的曲率相同,则双层板所承受的总弯矩等于上下两层板各自承受的弯矩之和。

这里需要指出的是:在假设的理想状态下,认为汽车荷载作用下,可以近似地忽略面层板与基层板竖向变形的影响,而利用薄板弯曲理论进行计算分析。笔者在力学分析时,取 $\mu_1 \approx \mu_2 = \mu$ 。

$$\left. \begin{aligned} M_x &= M_{x1} + M_{x2} = -(D_1 + D_2) \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) = -D_f \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \\ M_y &= M_{y1} + M_{y2} = -(D_1 + D_2) \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) = -D_f \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \\ M_{xy} &= M_{xy1} + M_{xy2} = -(D_1 + D_2) (1 - \mu) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} = -D_f (1 - \mu) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\}$$

式中: D_1 、 D_2 分别为上、下层板的弯曲刚度。

即:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= \frac{E_1 h_1^3}{12(1 - \mu^2)} \\ D_2 &= \frac{E_2 h_2^3}{12(1 - \mu^2)} \\ D_f &= D_1 + D_2 = \frac{E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3}{12(1 - \mu^2)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

双层板的弯曲刚度也可表示成面层或基层板当量厚度 h_d 的单层水板的弯曲刚度,即:

$$D_f = \frac{E_1 h_d^3}{12(1 - \mu^2)} \quad (2)$$

则相当的单层水泥混凝土路面板的当量厚度 h_d 为:

$$h_d = \sqrt[3]{\frac{12(1 - \mu^2) D_f}{E_1}} \quad (3)$$

得:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{x1} &= -\frac{E_1 z}{1 - \mu^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_{x2} &= -\frac{E_2 z}{1 - \mu^2} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

当计算分离式双层板上下层应力时,分别取 $z = h_1/2$ 和 $z = h_2/2$ 得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sigma_{x1}}{\sigma_{x2}} &= \frac{h_1 E_1}{h_2 E_2} \\ \text{即:} \\ \frac{h_1}{h_2} &= \frac{\sigma_{x1} E_2}{\sigma_{x2} E_1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

可以看出如果考虑到水泥混凝土面层板和基层板同时疲劳破坏,面层板和基层板合理的厚度比在理论上与其弹性模量及所受的应力成一定的比例关系。

对于上下层板尺寸不同,笔者将通过几何方法来推导。

图3为双层板在受荷变形后,根据假设忽略面层板和基层板的厚度变形,面层板顶部的弯沉量 w_1 等于基层板顶面的弯沉量 w_2 。

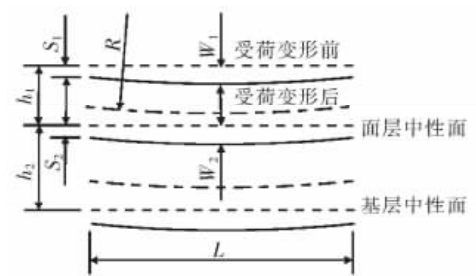


图3 双层板在受荷变形图

Fig.3 Two-layer slab deformation loading

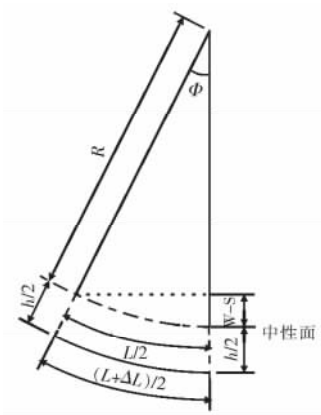


图4 板受荷变形几何分析图

Fig.4 Geometrical analysis of slab deformation after loading

根据板体受荷变形几何分析图(图4)可得:

$$\phi = \frac{L}{2R} = \frac{L + \Delta L}{2(R + h/2)}$$

故有:

$$LR + \frac{Lh}{2} = LR + \Delta LR \quad (6)$$

即:

$$\Delta L = \frac{Lh}{2R} \quad (7)$$

由于:

$$w - S = R - R \cos \Phi = R(1 - \cos \Phi)$$

又:

$$w_1 = w_2, S_1 = S_2$$

故有:

$$R_1(1 - \cos \Phi_1) = R_2(1 - \cos \Phi_2)$$

由式(7)对于面层板可得:

$$\Delta L_1 = \frac{L_1 h_1}{2R}$$

同理:

$$\Phi_2 = \frac{L_2}{2(R + \frac{h_1 + h_2}{2})} = \frac{L_2 + \Delta L_2}{2(R + \frac{h_1 + 2h_2}{2})}$$

即:

$$\Delta L_2 = \frac{L_2 h_2}{2(R + \frac{h_1 + h_2}{2})}$$

由于刚性板的挠度极小,所以板的弯曲半径 $R \geq (h_1 + h_2)/2$,分母中可以忽略 $(h_1 + h_2)/2$ 项。其实,双层板中假设上下两板的挠度一样也是忽略了这一项。由此可得:

$$\left. \begin{aligned} \Delta L_1 &= \frac{L_1 h_1}{2R} \\ \Delta L_2 &= \frac{L_2 h_2}{2R} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

又:

$$\Delta L_1 E_1 / L_1 = \sigma_{x1}; \Delta L_2 E_2 / L_2 = \sigma_{x2}$$

故有:

$$\frac{\sigma_{x1}}{\sigma_{x2}} = \frac{E_1 \Delta L_1}{E_2 \Delta L_2} = \frac{h_1 E_1}{h_2 E_2} \quad (9)$$

可以看出由几何推导的结果公式(9)和双层板理论推导的结果公式(5)完全相同。因此,无论面层和基层板的平面尺寸如何,在假设力学模型下,接触点的应力关系仍然满足关系式(5)。

3 合理的上下层板厚度思考

由式(5)可知,双层板所承受的应力与板厚及模量的乘积成正比。相对板厚越厚、模量越大,所承受的荷载应力越大,同时荷载疲劳应力作用也越大。

对于双层板结构,一旦其中一层疲劳断裂,应力会立即集中到另外一层,后果往往是另一层也会很快疲劳断裂。希望能设计出满足累计疲劳破坏的最合理的结构形式。也就是上下两层板要有一个合理厚度范围:即满足上下层板同时疲劳破坏。

按照水泥混凝土路面双层板上下层路面等强度设计原理,上下层路面的弯拉强度应该满足下式:

$$\frac{f_{r1} - \gamma_{r1} \sigma_{tr1}}{f_{r2} - \gamma_{r2} \sigma_{tr2}} = \frac{\gamma_{r1} \sigma_{pr1}}{\gamma_{r2} \sigma_{pr2}}$$

式中: f_{r1} 、 f_{r2} 为上下两层板的弯拉强度; γ_{r1} 、 γ_{r2} 为可靠度系数; σ_{tr1} 、 σ_{tr2} 为温度梯度疲劳应力; σ_{pr1} 、 σ_{pr2} 为下层板的荷载疲劳应力。

混凝土基层板距路表深而温度波动幅度很小,即便在面层温度变化较大的6、7月份,基层板的日温度变化幅度也仅为2~4℃,而土基的日温度变化则在2℃以下。因此,规范提出可以不必计算基层板的温度疲劳应力。同时,对于双层板上下层板应该取同样的可靠度系数,即 $\gamma_{r1} = \gamma_{r2}$ 。

故有:

$$\frac{f_{r1} - \gamma_{r1} \sigma_{tr1}}{f_{r2}} = \frac{\sigma_{pr1}}{\sigma_{pr2}} = \frac{k_{r1} k_{f1} k_c \sigma_{x1}}{k_{r2} k_{f2} k_c \sigma_{x2}} = N_e^{(n1-n2)} \frac{k_{r1} \sigma_{x1}}{k_{r2} \sigma_{x2}}$$

将式(5)代入可得:

$$\frac{f_{r1} - \gamma_{r1} \sigma_{tr1}}{f_{r2}} = N_e^{(n1-n2)} \frac{k_{r1} h_1 E_1}{k_{r2} h_2 E_2}$$

又:

$$\sigma_{tr1} = \frac{k_t B_{x1} \alpha_c E_1 h_1 T_g}{2}$$

因此,按照水泥混凝土面层板与基层板同时达到疲劳破坏原则,基层板厚度为:

$$h_2 = \frac{N_e^{(n1-n2)} k_{r1} h_1 E_1 f_{r2}}{k_{r2} E_2 (f_{r1} - \frac{1}{2} \gamma_{r1} k_t B_{x1} \alpha_c E_1 h_1 T_g)} \quad (10)$$

(下转第302页)

结构阻水作用有限,仅会对码头附近河段的水流条件产生一定影响。计算河段流场分布显示,码头工程的修建对河道流场特征、主流带位置及水动力轴线影响不大,主要对河道左岸工程附近水域的流速及流场分布产生一定影响;河心水域河道流速及右岸附近河道流速变化不大。可以预测该工程建成后,除对工程附近泥沙冲淤变形、河床形态产生不大的影响外,将不会对工程河段的河床演变规律及河势造成较大影响。

3 结 语

笔者建立的水流运动平面二维数学模型采用贴体正交曲线坐标,可克服模拟河道边界形状复杂的困难,并给出了正交曲线坐标下的二维水流数学模型的基本方程及数值计算方法。通过工程址区河段水位及流速的验证,计算结果与实测资料吻合较好。说明二维水流数学模型的建立和数值计算方法合理,能正确模拟实际河道的水流条件。

(上接第187页)

4 实例分析

以规范中计算示例(JTG D 40—2002, P84 附录C)为参考,取水泥混凝土面层板厚度为0.24 m,根据公式(10)可得:

$$h_2 = \frac{N_e^{(n_1-n_2)} k_{r1} h_1 E_1 f_{r2}}{k_{r2} E_2 (f_{r1} - \frac{1}{2} \gamma_{r1} k_t B_{x1} \alpha_c E_1 h_1 T_g)} = \frac{(2.03 \times 10^7)^{0.057-0.065} \times 0.87 \times 0.24 \times 31\,000 \times 4.0}{2.985 \times 27\,000 \times (5 - 0.5 \times 1.33 \times 0.515 \times 0.6 \times 1 \times 10^{-5} \times 31\,000 \times 0.24 \times 90)} = 0.077 \text{ m} \approx 8 \text{ cm}$$

原设计取16 cm 碾压混凝土。根据规范中对此类基层材料适宜厚度范围的规定,见表1。考虑最小结构层厚度,取 $h_2 = 12 \text{ cm}$ 。

表1 刚性、半刚性基层厚度的适宜范围

Tab. 1 The appropriate thickness range of rigid and semi-rigid base

基 层 类 型	厚度适宜的范围/mm
贫混凝土或碾压混凝土基层	120 ~ 200
水泥或石灰粉煤灰稳定粒料基层	150 ~ 250

5 结 论

1) 双层板水泥混凝土路面结构,无论上下层板的平面尺寸如何,在假设力学模型下,接触点的上下

板承受荷载应力关系满足关系式 $\frac{\sigma_{x1}}{\sigma_{x2}} = \frac{h_1 E_1}{h_2 E_2}$ 。

2) 对于双层板水泥混凝土路面结构,为满足同时疲劳破坏,得到合理的双层板厚度,上下层板的厚度

参考文献:

- [1] 杨斌. 重钢环保搬迁芭蕉角自备码头改扩建工程影响报告书[R]. 重庆:重庆交通大学, 2008.
- [2] 李义天, 赵明登, 曹志芳. 河道平面二维水沙数学模型[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2002.
- [3] 余明辉, 袁雄燕, 刘合翔, 等. 守恒性平面二维水流数学模型的研究[J]. 武汉大学学报:工学版, 2002, 35(3): 1-4.
- [4] 槐文信, 赵明登, 董汉毅, 等. 河道及近海水流的数值模拟[M]. 北京:科技出版社, 2005.
- [5] 陈明栋, 文岑, 杨胜发. 苏通长江公路大桥河段通航水流条件数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(12): 836-842.
- [6] 刘亚辉, 陈雪. 金沙江向家坝重大件码头选址与通航条件研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2009, 28(2): 139-141.
- [7] 黄碧珊. 正交贴体坐标系在河道水流计算中的应用[J]. 重庆交通学院学报, 1993, 12(2): 78-85.
- [8] 朱旭, 杨斌, 房春艳. 重庆寸滩三期工程平面二维水流数值模拟[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2009, 28(3): 768-770.

$$\text{应满足关系式 } h_2 = \frac{N_e^{(n_1-n_2)} k_{r1} h_1 E_1 f_{r2}}{k_{r2} E_2 (f_{r1} - \frac{1}{2} \gamma_{r1} k_t B_{x1} \alpha_c E_1 h_1 T_g)}。$$

参考文献:

- [1] 蒋应军, 戴学臻, 陈忠达, 等. 重载水泥混凝土路面损坏机理及对策研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(7): 31-34.
- [2] 巨锁基, 李宇峙. 局部脱空条件下 CRCP 荷载应力分析[J]. 2005, 22(5): 23-27.
- [3] 杨锡武, 王东, 张祖堂. 汽车超载对水泥混凝土路面破坏影响的力学机理分析[J]. 重庆交通学院学报, 2004, 23(6): 46-49.
- [4] 徐宏, 邓学钧, 倪富健. 水泥路面高温隆起的力学机理分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(2): 55-58.
- [5] 牛开民, 田波. 水泥混凝土路面等效疲劳温度应力系数[J]. 中国公路学报, 2006, 19(5): 23-28.
- [6] 谈至明, 姚祖康. 层间约束引起的双层水泥混凝土路面板的温度应力[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 25-28.
- [7] 蒋应军, 戴经梁. 传力杆与混凝土界面的接触应力[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 29-34.
- [8] 郑木莲, 陈拴发, 王秉纲. 水泥混凝土路面多孔混凝土基层的接缝间距[J]. 中国公路学报, 2007, 20(4): 23-28.
- [9] 蒋应军, 戴经梁, 陈忠达. 重载水泥混凝土路面疲劳方程和车辆轴载的换算[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2002, 22(3): 21-24.
- [10] 王选仓, 王新歧, 李春平, 等. 重载水泥混凝土路面研究[J]. 中国公路学报, 1999, 12(1): 14-18.
- [11] 唐伯明, 蒙华, 刘志军. 欧美水泥混凝土路面设计使用现状综述[J]. 公路, 2003(10): 37-39.
- [12] JTG D 40—2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S].