

半刚性基层材料硬化阶段的湿度应力

周玉民¹, 张兴华²

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 广州市市政设计研究总院, 广东 广州 510060)

摘要: 针对半刚性基层材料施工硬化阶段因湿度变化引起的开裂问题, 采用弹性地基梁力学模型, 讨论了干缩应变、地基反应模量、地基水平摩擦阻力系数等因素对湿度干缩应力、湿度翘曲应力的影响。分析结果表明, 湿度干缩应力系数随水平摩擦阻力的增大呈 S 型曲线增加, 最终收敛于 1; 而湿度翘曲应力系数是相对刚度半径 (即梁长与刚度半径比值) 的函数, 随着相对梁长的增大略超过 1 后趋近于 1。最后, 计算了常用水泥掺量下水泥稳定碎石在施工硬化阶段的湿度应力, 依据开裂判据, 硬化阶段水泥稳定碎石基层很容易产生早期开裂。

关键词: 道路工程; 干缩应变; 湿度梯度; 干缩应力; 翘曲应力

中图分类号: U416.223

文献标志码: A

Moisture Stresses of Semi-rigid Base at Hardening Stage During Construction

ZHOU Yumin¹, ZHANG Xinghua²

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute, Guangzhou 510060, China)

Abstract: In terms of semi-rigid base cracks induced by moisture change at hardening stage during construction, the shrinkage stress and curling stress were discussed in related to the factors of dry shrinkage strain, horizontal friction stiffness and vertical reaction modulus by using an elastic foundation beam model. The results show that the shrinkage stress ratio grows with increase of the horizontal friction stiffness in "S" trend and gradually converges to 1; whereas the curling stress ratio is the function of L/r (the ratio of the length and stiffness of the beam radius) with increase of L/r , firstly grows up and slightly exceeds 1 then comes down to 1. In the end, the moisture stresses for a group of cement stabilized aggregate with ordinary cement content are calculated, based on the crack criterion, it is easily judged

that the premature cracking on cement stabilized aggregate base would be induced at hardening stage.

Key words: road engineering; dry shrinkage strain; moisture gradient; shrinkage stress; curling stress

半刚性基层作为我国高等级公路的主要铺筑材料, 具有强度较高、刚度较大、板体性较好等优点, 但同时存在抗变形能力较差、对温湿度变化较为敏感等弱点, 因此, 基层在施工硬化阶段易产生收缩裂缝。针对半刚性基层收缩开裂这一问题, 国内有陆文学等^[1]、光同文^[2]、蔡智^[3]、单来等^[4]建立了温湿度均匀变化下半刚性基层的开裂模型, 分析了各影响因素对半刚性基层开裂的影响, 探讨了收缩裂缝的形成规律。国外有 Xuan 等^[5]建立了湿度均匀变化下基层干缩应力及裂缝宽度模型, 采用该模型对水泥处理建筑垃圾基层的开裂间距进行了预测, 预测结果与现场观测具有较好一致性; Ni 等^[6]建立了水泥稳定碎石基层收缩应力及收缩裂缝的有限元模型, 分析了失水率、模量及加铺层等因素对该模型的影响, 最后给出了基层裂缝间距的估计公式。以上研究大多集中在讨论温湿度均匀变化下基层截面内产生的干缩应力, 这对于已铺筑了面层的路面结构而言是合适的, 因为此时基层湿度较为稳定, 变化不大。但对于硬化阶段的基层而言, 半刚性基层裸露于大气环境中, 湿度沿基层厚度方向分布不均, 具有明显的梯度特征, 同时, 处于硬化阶段的基层其强度尚未完全形成, 此时基层截面若存在较大的湿度应力, 则易在基层表面引发裂缝。因此, 有必要弄清半刚性基层在施工硬化阶段由于湿度梯度作用所产生湿度翘曲应力的变化规律, 分析其对基层开裂的影响, 以便采取措施, 控制基层施工过程中硬化阶段出现的开裂。

1 基层湿度应力

1.1 力学模型

半刚性基层通常置于垫层或路基上,可将垫层或路基简化为弹性地基,半刚性基层与地基之间在切向上并非完全光滑,通常具有一定的摩擦阻力,需要加以考虑;半刚性基层横向尺寸有限,纵向上可视为无限长,可采用梁模型进行模拟.为此,采用如下基本假设:①半刚性基层材料是线弹性、各向同性、均匀的.②地基采用 Winkler 假设,且基层与地基始终紧密接触,无间隙.③半刚性基层与地基之间界面具有摩擦阻力,摩擦阻力 q_v 为地基界面水平摩擦阻力系数 k_u 与相应水平位移的乘积.

在湿度作用下,半刚性基层湿度应力的力学分析模型如图 1 所示.图中 x 为梁截面沿水平方向长度, m ; L 为基层长度, m ; V 为梁截面剪力, M 为梁截面弯矩, N 为梁截面轴力, h 为基层厚度, m ; q_u 为水平摩擦阻力, N ; q_v 为地基反力, N .

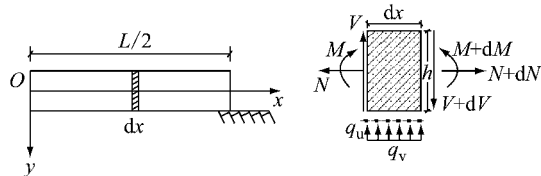


图 1 力学模型

Fig. 1 Mechanical model

1.2 模型求解

半刚性基层湿度应力可分解为两部分:一部分是半刚性基层内部含水率均匀升降引起的轴向干缩应力;另一部分是沿基层厚度方向含水率非均匀变化引起的湿度翘曲应力,两部分应力的叠加即为基层内总的湿度应力.

一般而言基层湿度分布具有非线性,但因基层厚度不大,可近似为线性分布,沿厚度方向的湿度可表示为

$$m(x) = \Delta m + m_g \cdot y; \quad (1)$$

式中: $m(x)$ 为沿基层厚度方向的含水率, %; y 为沿厚度方向长度, m ; Δm 为含水率的均匀变化量, %; m_g 为湿度梯度,即单位厚度上的含水量变化率, $10^{-2} m^{-1}$;

1.2.1 湿度干缩应力

当湿度均匀变化时,半刚性基层截面弯拉应力影响较小,可忽略不计.基层截面的最大干缩应力可采用如下简化的形式^[7]:

$$\sigma_{\max} = -E \cdot \epsilon_s \cdot (1 - 1/\cosh(\psi \cdot L/2)) \quad (2)$$

式中: E 为基层材料弹性模量, MPa ; ϵ_s 为基层干缩应变, 10^{-6} ; $\psi = (k_u/(E \cdot h))^{0.5}$, 其中 k_u 为地基水平摩擦阻力系数, $MPa \cdot m^{-1}$.

1.2.2 湿度翘曲应力

湿度梯度所引起的湿度翘曲应力,综合静力平衡、变形假设及边界条件^[8],其控制微分方程如下:

$$\begin{cases} q_v = -k_v \cdot w(x) \\ q_u = -k_u \cdot (u(x) - h_c \cdot w'(x)) \\ dV/dx = -q_v \\ dN/dx = -q_u \\ dM = (V - h_c \cdot q_u) \cdot dx \\ -D \cdot d^2w(x)/dx^2 = M(x) + D \cdot \alpha_d \cdot m_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_v 为地基反应模量, $MPa \cdot m^{-1}$; $w(x)$ 、 $u(x)$ 分别为梁的挠度和截面水平位移, m ; h_c 为中性轴到截面上(下)边缘的距离, $h_c = h/2$, m ; D 为梁截面弯曲刚度,即 $D = Eh^3/12$; α_d 为干缩系数, 10^{-8} .

联立以上微分方程及模型边界条件可求出 $w(x)$ 、 $u(x)$,具体求解过程参考文献^[8].

基层表面最大翘曲应力计算公式最终写为

$$\sigma_{mg}(x) = 0.5 \cdot C_{mg} \cdot E \cdot \alpha_d \cdot m_g \cdot h \quad (4)$$

式中: C_{mg} 为湿度翘曲应力系数,是 k_v 、 k_u 以及基层相对刚度半径 L/r 等参数的函数,其中 $r = (E \cdot h^3/(12k_v))^{0.25}$.

2 模型参数

针对工程中广泛采用的水泥稳定碎石基层材料,参数取值^[9-12]见表 1.

表 1 模型参数

Tab. 1 Model parameters

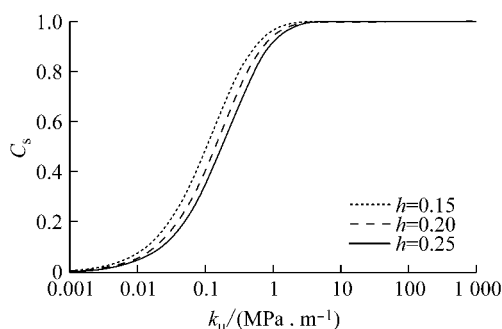
L/m	h/m	$k_v/$ ($MPa \cdot m^{-1}$)	$k_u/$ ($MPa \cdot m^{-1}$)	E/MPa
≥ 0.1	0.15~0.25	30~240	≥ 0	500~1 500

3 湿度应力敏感性分析

3.1 干缩应力特性

基层干缩应力是 E 、 ϵ_s 、 k_u 以及 L 、 h 等参数的函数,取 $L=100 m$, $E=1\ 000 MPa$,干缩应力系数 C_s ($C_s = \sigma_{\max}/(E \cdot \epsilon_s)$)随各参数变化的曲线见图 2.

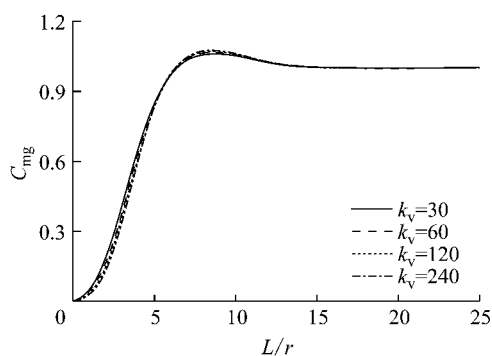
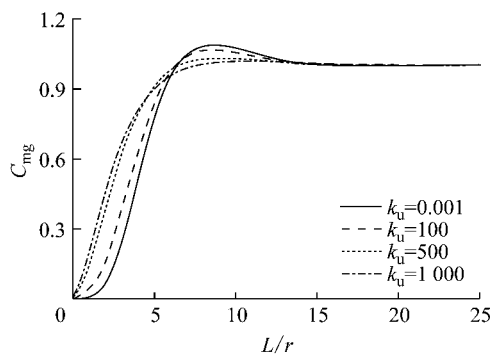
从图 2 可见,当 k_u 很小时, C_s 趋于零,此时基层为自由收缩状态,随着 k_u 增加, C_s 呈 S 型增加,最终收敛于 1;增加基层厚度, C_s 减小,可知适当降低 k_u 或增加 h ,一定程度上可降低 C_s . 计算表明,当 L 、 E

图 2 C_s 随 k_u 的变化曲线Fig. 2 Diagram of $C_s \sim k_u$

取不同值时,曲线 $C_s \sim k_u$ 的变化规律均相似。

3.2 翘曲应力特性

当 $L=100$ m, $E=1\ 000$ MPa 时, C_{mg} 随各参数的变化如图 3。从图 3a 中可见, C_{mg} 随着 L/r 的增加而增大,达到最大值后,逐渐收敛于 1,当地基反应模量 k_v 在 $30 \sim 240$ MPa \cdot m $^{-1}$ 之间逐渐增加时, C_{mg} 随之增加,但增幅不大,其最大值变化范围为 $1.060 \sim 1.075$, 小于 5%, 所以 k_v 对 C_{mg} 影响较小。从图 3b 可见, k_u 同 k_v 具有类似的变化规律,但当 k_u 在 $0.01 \sim 1\ 000$ MPa \cdot m $^{-1}$ 之间逐渐增加时, C_{mg} 的最大值变化范围为 $1.018 \sim 1.086$, 故 k_u 对 C_{mg} 影响也较小。经计算表明,当 L 、 E 取不同的值时,曲线 $C_{mg} \sim k_u$ 的变

a 不同 k_v b 不同 k_u 图 3 C_{mg} 随 L/r 的变化曲线Fig. 3 Diagram of $C_{mg} \sim L/r$

化规律均与之相似。

4 基层收缩应力估计与开裂判别

施工硬化阶段的道路基层不仅会因失水产生湿度应力,而且还会受温度影响而产生温度应力,关于温度应力的计算只需将式(2)和(4)中相关的湿度参数 α_d 、 m_g 、 Δm 、 C_s 、 C_{mg} 替换成温缩系数 α_t 、温度梯度 T_g 、温度均匀变化量 ΔT 、温缩应力系数 C_t 、温度翘曲应力系数 C_{tg} 即可。在湿度和温度共同作用下的最大收缩应力为

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_t \quad (5)$$

式中: σ_m 为湿度应力, $\sigma_m = \sigma_s + \sigma_{mg}$, σ_s 为干缩应力, $\sigma_s = C_s E \epsilon_s$, σ_{mg} 为湿度翘曲应力, $\sigma_{mg} = 0.5 C_{mg} \cdot E \alpha_d m_g h$; σ_t 为温度应力, $\sigma_t = \sigma_{\Delta t} + \sigma_{tg}$, $\sigma_{\Delta t}$ 为温缩应力, $\sigma_{\Delta t} = C_{\Delta t} E \alpha_t \Delta T$, σ_{tg} 为温度翘曲应力, $\sigma_{tg} = 0.5 \cdot C_{tg} E \alpha_t T_g h$ 。在施工硬化阶段,基层可视为无限长,此时 C_s 、 C_{mg} 、 C_t 、 C_{tg} 均取 1。

半刚性基层硬化阶段开裂判别式如下:

$$\sigma \leq [\sigma] \quad (6)$$

式中: σ 为收缩应力; $[\sigma]$ 为开裂控制应力,一般取值范围为 $0.3 \sim 0.6$ MPa。

通过室内试验测定不同水泥掺量下水泥稳定碎石材料的干缩应变、平均干缩系数和不同龄期下试件的劈裂强度 R_i , 见表 2, 可以发现水泥稳定碎石材料 7 d 劈裂强度约为 90 d 龄期的 60%, 其强度尚未形成。对于施工硬化阶段的水泥稳定碎石基层, $m_g h$ 变化范围一般介于 $0 \sim 5.5\%$ 。 α_t 变化范围^[9] 为 $(8 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6})/\%$, ΔT 取典型昼夜温差平均值 15°C , 温度梯度 T_g 参考水泥混凝土路面温度梯度, 取 $60^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$, 基层厚度取 0.25 m。各参数取值及计算结果见表 2、表 3。

表 2 不同水泥掺量下水泥稳定碎石试验参数

Tab. 2 Experimental parameters of cement stabilized macadam with different cement content

类型	质量 分数	R_i/MPa			平均干缩 系数/ 10^{-8}	干缩应 变/ 10^{-6}
		7 d	28 d	90 d		
水稳 1	3%	0.30	0.47	0.51	91.5	175
水稳 2	4%	0.43	0.63	0.66	113.4	198
水稳 3	5%	0.50	0.79	0.87	122.7	243

由表 3 可知,水泥稳定碎石材料在硬化阶段收缩应力很容易超过其抗拉强度而出现拉裂破坏。不同水泥掺量下的水泥稳定碎石材料的 σ_m 普遍大于 σ_t , 湿度翘曲应力约占整个湿度应力的 $25\% \sim 55\%$, 基层湿度翘曲应力不容忽视。

因此,在基层硬化阶段,特别是在高温季节施工

表 3 不同水泥掺量下水泥稳定碎石湿度应力

Tab. 3 Humidity stress of cement stabilized macadam with different cement content

类型	E/MPa	$a_t/10^{-8}$	$m_{gh}/\%$	σ_{\max}/MPa	$\sigma_{\text{mg}}/\text{MPa}$	$\sigma_{\Delta t}/\text{MPa}$	$\sigma_{\text{tg}}/\text{MPa}$	σ/MPa
水稳 1	800	8	1.5	0.14	0.05	0.10	0.05	0.34
			4.5	0.14	0.16	0.10	0.05	0.45
水稳 2	1 000	10	1.5	0.20	0.09	0.15	0.08	0.51
			4.5	0.20	0.26	0.15	0.08	0.68
水稳 3	1 200	12	1.5	0.29	0.11	0.22	0.11	0.73
			4.5	0.29	0.33	0.22	0.11	0.95

时,应采取及时有效的养护措施,如采取覆盖塑料膜、土工布、撒铺乳化沥青、湿沙、洒水等措施,减少基层表面水分散失,降低基层截面的湿度变化量和湿度梯度;或在混合料中掺加聚合物、乳化沥青、膨胀剂等对混合料性能进行改性,提高基层抵抗开裂的极限应变,进而达到降低基层开裂的目的。

5 结论

针对半刚性基层材料施工硬化阶段的开裂问题,通过建立力学模型分析了干缩应变、湿度梯度、地基反应模量及水平摩擦阻力系数对基层湿度应力的影响,所得结论如下:

(1) C_s 随着 k_u 的增加而增大;当 $k_u=0$ 时, $C_s=0$, 此时基层处于自由收缩状态,当 k_u 逐渐增加时, C_s 呈 S 型曲线增长,最终收敛于 1. 所以,适当降低 k_u , 在一定程度上可降低 C_s .

(2) C_{mg} 是 L/r 的函数,随着相对梁长的增大而略超过 1 然后下降并趋近于 1,随着 k_v 的增加而增大、 k_u 的增加而减小,但变化幅度均小于 10%.

(3) 计算了常用水泥掺量下水泥稳定碎石在施工硬化阶段的收缩应力,依据开裂判据,硬化阶段水泥稳定碎石基层很容易产生早期开裂,需要采取措施予以控制。

参考文献:

- [1] 陆文学, 陈崇驹, 丛林. 半刚性基层养护期干缩开裂发展过程的分析[J]. 公路, 2002(12):132.
LU Wenxue, CHEN Chongju, CONG Lin. Analysis of drying shrinkage procedure of semi-rigid basecourse during maintenance[J]. Highway, 2002(12):132.
- [2] 光同文. 半刚性基层温缩裂缝控制措施的研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2003, 26(1):127.
GUANG Tongwen. Measures for controlling the thermo-contraction crack on the semi-rigid base course[J]. Hefei University of Technology(Natural Science Edition), 2003, 26(1):127.
- [3] 蔡智. 半刚性基层收缩开裂机理与模型研究[D]. 武汉: 武汉

理工大学, 2009.

CAI Zhi. Cracking mechanism and model of semi-rigid road [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.

- [4] 单来, 刘道斌, 沈卫国, 等. 半刚性路面基层收缩开裂静态力学模型研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(2):40.
SHAN Lai, LIU Daobin, SHEN Weiguo, *et al.* Investigation on static mechanics model on the shrinkage cracking of semi-rigid base course[J]. Wuhan University of Technology, 2012, 34(2):40.
- [5] XUAN D X, MOLENAAR A A A, HOUBEN L J M. Shrinkage cracking of cement treated demolition waste as a road base[J]. Materials & Structures, 2016, 49(1/2):631.
- [6] ZHANG Peng, LI Qingfu, LIU Chenhui. Prediction of shrinkage cracking and corresponding cracking prevention measure of the semi-rigid base layer[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2009, 10(5):383.
- [7] 张鹏. 高等级公路半刚性基层材料的抗裂性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
ZHANG Peng. Research on anti-cracking performance of semi-rigid base course in high-grad highway [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [8] 谈至明. 具有水平摩擦阻力的弹性地基上梁的解[J]. 力学与实践, 1997, 19(3):33.
TAN Zhiming. Solutions on elastic foundation with a horizontal resistance beams [J]. Mechanics in Engineering, 1997, 19(3):33.
- [9] 杨文丁. 半刚性基层材料收缩性能研究[D]. 长安: 长安大学, 2004.
YANG Wending. Shrinking properties of semi-rigid materials [D]. Chang'an: Chang'an University, 2004.
- [10] 蒋应军. 水泥稳定碎石基层收缩裂缝防治研究[D]. 长安: 长安大学, 2001.
JIANG Yingjun. Research on controlling of cracks of cement stabilized macadam base[D]. Chang'an: Chang'an University, 2001.
- [11] 孙亦纯. 改善水泥稳定碎石混合料收缩性能的实验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
SUN Yichun. Research on improving shrinkage performance of cement stabilized gravel [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [12] 丛林, 郭忠印, 暨育雄, 等. 半刚性基层材料性能参数的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2001, 4(4):385.
CONG Lin, GUO Zhongyin, JI Yuxiong, *et al.* Experimental study on the performance of semi-rigid base coarse materials [J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(4):385.