

路面结构的土基应力应变近似计算

胡洪龙, 谈至明

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 从研究双圆荷载作用于双层路面结构时土基应力、应变入手, 分析了不同轴型、不同荷位和多层结构条件下, 土基不同深度的压应力、压应变的变化规律, 通过引入旁侧轮系数 ξ 、邻轴系数 ζ 和荷位系数 φ 并归纳它们的近似回归式, 建立了具有普适性和较高精度的路面结构下土基的竖向最大压应力和压应变的近似计算式。

关键词: 路面工程; 土基; 竖向应力; 竖向应变; 弯曲刚度半径

中图分类号: U 416

文献标志码: A

Approximate Calculation of Subgrade Stresses and Strains of Pavement Structures

HU Honglong, TAN Zhiming

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Subgrade stresses and strains for a two-layer pavement structure under dual wheels are first studied. In different axles, loading positions and multilayer structure cases, the rules of compressive stresses and strains at subgrade depth are then analyzed. By introducing the concepts of side wheel coefficient ξ , adjacent axle coefficient ζ , position coefficient φ and generalizing approximate regression equations of them, universal and high precision computation expressions of subgrade vertical compressive stresses and strains under pavement structure are established.

Key words: pavement engineering; subgrade; vertical stresses; vertical strains; radius of relative stiffness

土基竖向应力、应变是路面结构设计的重要指标。路面结构主要功能就是降低土基的竖向应力, 确保土基不出现过量的变形。CBR (California bearing ratio) 法即是以 CBR 值表征土基承载能力的一种沥青路面结构设计方法^[1]。国内外学者对不同路面结构下的土基竖向应力、应变做了大量的研究。Franco

Gomez-Ramirez M 等^[2] 根据 NAPTF (National Airfield Pavement Test Facility) 试验结果, 对沥青道面下的土基顶面竖向应力、应变进行了分析。Warren 等^[3-4] 通过建立试验路段测定了柔性基层沥青路面下的土基竖向应力大小。廖公云、朱海波等^[5-6] 对半刚性基层沥青路面下的土基竖向应力、应变进行了实测^[5-6]。Child 等^[7] 对级配碎石基层水泥混凝土路面下的土基顶面压应力进行测定, 给出了荷载作用于水泥混凝土路面板不同位置时的土基竖向应力值^[7]。此外, Khanal、林小平等^[8-9] 使用有限元方法, 对不同路面结构下的土基竖向应力进行了研究。以上研究主要针对一些特定的路面结构, 对土基竖向应力、应变与土基深度和路面结构参数的关系缺乏深入的分析 and 总结。因此, 有必要对荷载作用下路面结构的土基竖向应力、应变大小及其在土基深度方向的变化规律进行深入的研究。

1 双层结构的土基应力、应变

双层结构及双圆荷载的示意图见图 1。图 1 中, q_0 为均布荷载, δ 为荷载圆半径, E_1, E_0 分别为面层和土基模量, μ_1, μ_0 分别为面层和土基的泊松比, h_1 为面层厚度, z 为土基深度方向, x 为与双圆荷载平行的方向, y 为水平面上与双圆荷载垂直的方向。原点设于双圆间隙中心下的土基顶面 O 点。双圆荷载

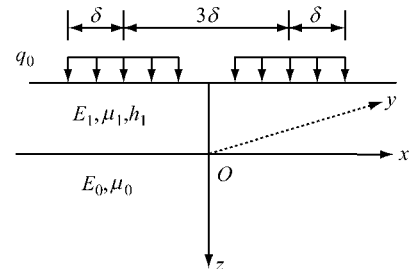


图 1 双层结构及外荷载示意图

Fig.1 Two layers pavement structure and loads

$P=50\text{ kN}$, $q_0=0.7\text{ MPa}$, $\delta=106.5\text{ mm}$. 路面结构参数: $h_1=0.1\sim0.7\text{ m}$, $E_1=1\ 000\sim31\ 000\text{ MPa}$, $E_0=20\sim200\text{ MPa}$, $\mu_1=0.15$, $\mu_0=0.40$.

1.1 土基顶面应力

双圆荷载作用下的土基顶面竖向最大压应力 σ_{z0} 位于双圆荷载间隙中点, 其值可近似为面层刚度半径 l 与荷载圆半径 δ 之比 l/δ 的函数^[10]:

$$\begin{aligned}\sigma_{z0} &= q_0 \Psi_z \\ \Psi_z &= \alpha_z \left(\frac{l}{\delta} + 1 \right)^{-\beta_z} \\ l &= \sqrt[3]{\frac{E_1 h_1^3 (1 - \mu_0^2)}{6 E_0 (1 - \mu_1^2)}}\end{aligned}\quad (1)$$

式中: α_z, β_z 为回归系数, 层间光滑时, $\alpha_z=1.60$, $\beta_z=2.03$, $R^2=0.998$; 层间连续时, $\alpha_z=1.55$, $\beta_z=2.00$, $R^2=0.999$.

柔性基层沥青路面结构的刚度半径 l 一般不小于 0.20 m , 由式(1)可推出, 双圆荷载作用下的土基顶面竖向最大压应力 σ_{z0} 不大于 130 kPa ; 半刚性基层沥青路面结构的刚度半径 l 一般不小于 0.25 m , 由式(1)可得, 双圆荷载作用下的土基顶面竖向最大压应力 σ_{z0} 不大于 96 kPa .

面层与土基层间光滑, 土基顶面竖向压应力最大点的 x 方向应力 σ_{x0} 和 y 方向应力 σ_{y0} 与土基顶面竖向最大压应力 σ_{z0} 、土基泊松比 μ_0 之间有如下关系:

$$\sigma_{x0} \approx \sigma_{y0} \approx (\mu_0 + 0.5) \sigma_{z0} \quad (2)$$

1.2 深度方向的土基应力

将土基任一深度处的最大应力 $\sigma_x(z), \sigma_y(z), \sigma_z(z)$ 与土基顶面最大应力 $\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \sigma_{z0}$ 之比记作 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 即

$$\theta_x = \frac{\sigma_x(z)}{\sigma_{x0}}, \theta_y = \frac{\sigma_y(z)}{\sigma_{y0}}, \theta_z = \frac{\sigma_z(z)}{\sigma_{z0}} \quad (3)$$

$\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 称为土基应力衰减系数, 它随着土基深度 z 的增加而减小, 随着刚度半径 l 的增加而增加. θ_x 和 θ_y 大致相等, 可统一记为 $\theta_{x,y}$. $\theta_{x,y}$ 随土基深度增加的收敛速度快于 θ_z . 研究发现, 将土基深度 z 、刚度半径 l 和荷载半径 δ 合并成一个参数 $\eta = z/(l + \delta)$, 则不同路面结构的土基应力衰减系数 $\theta_{x,y}, \theta_z$ 均可视为参数的一元函数, 见图2, 它们的回归式可统一表示为

$$\theta_{x,y} = \theta_z = \exp[-(a\eta^2 + b\eta + c)\eta] \quad (4)$$

式中: a, b, c 为回归系数, 见表1.

1.3 土基竖向应变

多数情况下, 土基任一深度处的竖向压应变最大点与压应力最大点重合, 竖向压应变最大点与压

表1 式(4)的回归系数 a, b, c

分类	衰减系数	a	b	c	R^2
层间光滑	$\theta_{x,y}$	0.107	-0.695	2.762	0.999
	θ_z	-0.006	-0.023	0.740	0.998
层间连续	$\theta_{x,y}$	0.271	-0.877	2.586	0.998
	θ_z	0.058	-0.339	1.223	0.998

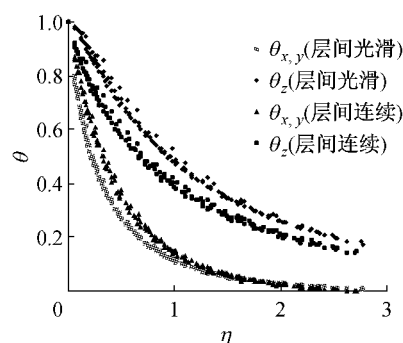


图2 土基应力衰减系数 θ 与 η 的关系

Fig.2 Relationship of subgrade stresses attenuation coefficient θ and η

应力最大点不重合时, 两点处的压应变在数值上相差甚微, 可近似认为其相等. 根据各向同性弹性本构方程, 土基任一深度处竖向最大压应变 $\epsilon_z(z)$ 为

$$\epsilon_z(z) = \frac{1}{E_0} [\sigma_z(z) - \mu_0 (\sigma_x(z) + \sigma_y(z))] \quad (5)$$

面层与土基层间光滑时, 将式(2)和式(3)代入式(5)可得

$$\epsilon_z(z) = \frac{\sigma_{z0}}{E_0} [\theta_z - \mu_0 (1 + 2\mu_0) \theta_{x,y}] \quad (6)$$

面层与土基层间连续时, 回归得到土基顶面压应变 ϵ_{z0} 与土基顶面压应力 σ_{z0} 有如下关系:

$$\epsilon_{z0} = \frac{1 + 0.88\mu_0 - 2.73\mu_0^2}{E_0} \sigma_{z0} \quad (7)$$

进一步可推出土基任一深度处竖向最大压应变 $\epsilon_z(z)$ 为

$$\epsilon_z(z) = \frac{\sigma_{z0}}{E_0} [\theta_z - \mu_0 (0.88 - 2.73\mu_0) \theta_{x,y}] \quad (8)$$

将式(1)和式(4)代入式(6)或式(8), 即可得到任一深度的土基最大竖向应变值. 与用 BISAR 软件计算结果相比, 层间光滑时, 两者之间的偏差小于 $11\text{ }\mu\text{m}$; 层间连续时, 两者之间的偏差不大于 $12\text{ }\mu\text{m}$.

2 多层结构的土基应力、应变

路面结构有基层时, 可按弯曲刚度等效原则将面层和基层合并成一层结构^[11], 面层和基层总的刚度半径 l_g 可按式计算:

$$l_g = \sqrt[3]{\frac{2D_g(1-\mu_0^2)}{E_0}} \quad (9)$$

式中: D_g 为面层和基层总的弯曲刚度.

$$D_g = \frac{\hat{E}_1 h_1^3}{12} + \frac{\hat{E}_2 h_2^3}{12} + \frac{(h_1 + h_2)^2}{4} e k_u$$

$$e^{-1} = \frac{1}{\hat{E}_1 h_1} + \frac{1}{\hat{E}_2 h_2}$$

$$\hat{E}_1 = \frac{E_1}{1-\mu_1^2} \quad \hat{E}_2 = \frac{E_2}{1-\mu_2^2} \quad (10)$$

式中: E_2, h_2, μ_2 分别为基层的模量、厚度、泊松比; k_u 为层间接触系数, 层间连续时, $k_u=1$, 层间光滑时, $k_u=0$.

面、基层连续, 基层与土基光滑时, 与理论结果相比, 土基竖向的最大应力偏差不超过 2 kPa; 最大应变的偏差小于 12 μm . 各层之间连续时, 土基竖向的最大压应力偏差不大于 2 kPa, 最大应变的偏差小于 15 μm .

若路面结构超过二层, 可由上而下逐层换算, 先利用式(10)计算出一、二层总的弯曲刚度, 再利用式(11)得出一、二层的当量结构层的模量 E_x 、厚度 h_x

$$E_x = \frac{h_1^2 \hat{E}_1 + h_2^2 \hat{E}_2}{h_1^2 + h_2^2}, \quad h_x = \sqrt[3]{12D_g/E_x} \quad (11)$$

然后再由式(10)和式(11)计算出一、二、三层的当量结构层, 如此换算至双层结构后, 利用式(9)计算出路面结构总的刚度半径 l_g , 最后根据式(6)和式(8)求得土基的应力、应变.

3 旁侧轮系数和邻轴系数

道路上行驶的载重车辆有单轴、双轴和三轴 3 类轴型. 单轴荷载可视为在双圆荷载的 x 方向一定距离(轮距取 1.8 m)处又施加一个双圆荷载, 新加双圆荷载对土基竖向最大应力(或应变)的影响可以用应力的旁侧轮系数 ξ_σ (或应变的旁侧轮系数 ξ_ϵ)来表示; 双轴荷载可视为在单轴荷载的 y 方向一定距离(轴距取 1.4 m)处再作用另一个单轴荷载, 三轴荷载与之类似, 新加轴载对土基竖向最大应力(或应变)的影响用应力的邻轴系数 $\zeta_{\sigma,n}$ (或应变的邻轴系数 $\zeta_{\epsilon,n}$)来表示. 因此, n 轴荷载作用下, 土基任一深度处的竖向最大应力 $\sigma_{z,n}(z)$ (或应变 $\epsilon_{z,n}(z)$)可写成下式:

$$\sigma_{z,n}(z) = \sigma_z(z)(1 + \xi_\sigma)(1 + \zeta_{\sigma,n}) \quad (12a)$$

$$\epsilon_{z,n}(z) = \epsilon_z(z)(1 + \xi_\epsilon)(1 + \zeta_{\epsilon,n}) \quad (12b)$$

3.1 土基竖向应力

双层结构时, 应力的旁侧轮系数 ξ_σ 及邻轴系数

$\zeta_{\sigma,n}$ 随着面层厚度 h_1 、土基深度 z 和面层刚度半径 l 的变化而变化. 层间光滑时, 旁侧轮系数 ξ_σ 及双轮荷载时的邻轴系数 $\zeta_{\sigma,2}$ 的回归式可写成

$$\xi_\sigma(\zeta_{\sigma,2}) = \exp\left(-\frac{1}{A\nu_\sigma + B}\right)$$

$$\nu_\sigma = \frac{z + \lambda h_1}{\pi \delta} \left(\frac{l}{\delta} + 1\right) \quad (13)$$

式中: ν_σ 可称为相对深度; λ 为回归系数, 可近似取 0.4n; A, B 为回归系数, 对于 ξ_σ , 分别为 0.046, -0.285, $R^2=0.995$; 对于 $\zeta_{\sigma,2}$, 分别为 0.074, -0.221, $R^2=0.992$.

三轴荷载时的邻轴系数 $\zeta_{\sigma,3}$ 的回归式为

$$\zeta_{\sigma,3} = 2 \exp\left(-\frac{1}{0.036\nu_\sigma + 0.072}\right) \quad (14)$$

层间连续条件下 $\xi_\sigma, \zeta_{\sigma,2}$ 和 $\zeta_{\sigma,3}$ 的数值比层间光滑条件下的数值稍大, 其差值一般不超过 0.04, 可予忽略.

3.2 土基竖向应变

应变的旁侧轮系数 ξ_ϵ 、邻轴系数 $\zeta_{\epsilon,n}$ 的回归形式与应力的旁侧轮系数 ξ_σ 、邻轴系数 $\zeta_{\sigma,n}$ 的回归形式相同. 双层结构层间光滑时, 对于 ξ_ϵ , 回归系数 A, B 分别为 0.040, -0.236, $R^2=0.991$; 对于 $\zeta_{\epsilon,2}$, A, B 分别为 0.065, -0.122, $R^2=0.992$; 对于 $\zeta_{\epsilon,3}$, A, B 分别为 0.032, 0.130, $R^2=0.989$. 相对深度 ν_ϵ 中回归系数 λ 可近似地取 0.2(n-1). 层间连续条件下的 $\xi_\epsilon, \zeta_{\epsilon,2}$ 和 $\zeta_{\epsilon,3}$ 值稍大于层间光滑条件下的值, 但其差值一般小于 0.05, 可予忽略.

多层结构时, 旁侧轮系数 ξ 和邻轴系数 ζ 仍可按上述方法计算, 只需在相对深度 ν 计算式中的面层厚度 h_1 和刚度半径 l 分别换成路面结构层的总厚度 h 和总的刚度半径 l_g 即可.

4 荷位系数

对于水泥混凝土路面而言, 车辆荷载位于水泥混凝土路面板的不同位置, 例如, 板中、板边缘、板角隅时, 土基的应力、应变是不同的. 荷载位于路面板角隅时, 土基的竖向应力、应变为最大, 它们较上述的板中荷位的最大应力、应变之增大比例可引入荷位系数来表征, 即

$$\sigma_{c,z,n}(z) = \sigma_{z,n}(z)(1 + \varphi_\sigma)$$

$$\epsilon_{c,z,n}(z) = \epsilon_{z,n}(z)(1 + \varphi_\epsilon) \quad (15)$$

式中: $\sigma_{c,z,n}, \epsilon_{c,z,n}$ 分别为荷载位于板角隅时土基的竖向最大应力、应变; $\varphi_\sigma, \varphi_\epsilon$ 分别为土基竖向最大应力、应变的荷位系数.

4.1 计算方法及参数

荷载位于水泥混凝土路面板角隅时的土基应力、应变采用有限元法计算,水泥混凝土路面板平面尺寸取为 $5\text{ m} \times 4\text{ m}$,基层纵、横向加宽 3 m ,底基层和基层同尺寸,土基相对基层横向加宽 4 m ,纵向加宽 6 m ,土基深度为 8 m ,土基尺寸为 $17\text{ m} \times 18\text{ m} \times 8\text{ m}$. 土基竖向采用不等尺寸划分为 14 层,上密下

疏,土基单元最小网格尺寸为 $0.06\text{ m} \times 0.06\text{ m}$. 土基与底基层(或基层)层间连续或光滑,其他各层之间均光滑.

计算选取的 3 种路面结构参数见表 2. 分别计算单轴-双轮、双轴-双轮和三轴-双轮(单轴重均为 100 kN)作用下,土基顶面至深度 3 m 范围内的竖向最大应力、应变.

表 2 路面结构参数

Tab.2 Pavement structure parameters

路面结构	结构 1			结构 2			结构 3		
	模量/MPa	厚度/m	泊松比	模量/MPa	厚度/m	泊松比	模量/MPa	厚度/m	泊松比
面层	29 000	0.25	0.15	31 000	0.27	0.15	31 000	0.31	0.15
基层	300	0.20	0.30	2 000	0.20	0.20	27 000	0.18	0.15
底基层				250	0.18	0.30	250	0.20	0.30
土基	40,60, 80,200		0.40	40,60, 80,200		0.40	40,60, 80,200		0.40

4.2 土基竖向应力

土基顶面的应力荷位系数 φ_σ 单轴时为 $0.70 \sim 3.50$; 双轴时为 $0.45 \sim 2.80$; 三轴载时为 $0.50 \sim 2.75$. 随着土基深度的增加,应力荷位系数 φ_σ 减小,当 $z=3\text{ m}$ 时, φ_σ 约为土基顶面的 $5\% \sim 25\%$. 应力荷位系数 φ_σ 与相对深度 ν_σ 之间关系如图 3 所示,可近似表示为

$$\varphi_\sigma = C_\sigma \nu_\sigma^{-D_\sigma} \quad (16)$$

土基和底基层(或基层)连续时,回归系数 C_σ , D_σ 值见表 3. 层间光滑时的应力荷位系数 φ_σ 约为层间连续时的 $1.05 \sim 1.20$ 倍.

表 3 荷位系数回归系数 C_σ , D_σ

Tab.3 Regression parameters C_σ , D_σ

轴型	C_σ	D_σ	R^2
单轴	50	1.25	0.980
双轴	90	1.45	0.988
三轴	130	1.45	0.983

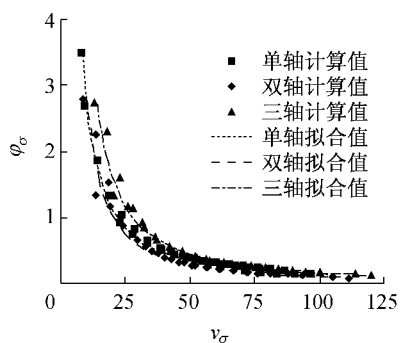


图 3 层间连续时 $\varphi_\sigma - \nu_\sigma$ 关系

Fig.3 $\varphi_\sigma - \nu_\sigma$ curve with bonded interface

4.3 土基竖向应变

土基与底基层(或基层)层间连续,单轴荷载作

用于水泥混凝土板时,在土基顶面,应变的荷位系数 φ_ϵ 在 $0.90 \sim 5.30$ 之间;多轴(双轴和三轴)荷载时, φ_ϵ 分别在 $0.65 \sim 4.50$ 和 $0.65 \sim 4.65$ 之间. 当 $z=3\text{ m}$ 时, φ_ϵ 约为土基顶面的 $5\% \sim 20\%$ 左右.

应变的荷位系数 φ_ϵ 与 ν_ϵ 之间有如下关系:

$$\varphi_\epsilon = C_\epsilon \nu_\epsilon^{-D_\epsilon} \quad (17)$$

土基与底基层(或基层)层间连续时,回归系数 C_ϵ , D_ϵ 值见表 4. 层间光滑时应变的荷位系数 φ_ϵ 约为层间连续时的 $1.10 \sim 1.25$ 倍.

表 4 荷位系数回归系数 C_ϵ , D_ϵ

Tab.4 Regression parameters C_ϵ , D_ϵ

轴型	C_ϵ	D_ϵ	R^2
单轴	40	1.20	0.971
双轴	60	1.40	0.970
三轴	70	1.35	0.975

5 结论

(1) 双圆荷载作用于双层结构时,土基顶面横向(平行双圆荷载方向)应力 σ_{x0} 和纵向(垂直双圆荷载方向)应力 σ_{y0} 在层间光滑时可认为相等. 在深度方向,土基横、纵向的应力收敛速度要大于土基竖向的应力收敛速度.

(2) 多层结构时土基竖向应力、应变的计算可采用双层结构时的土基竖向应力、应变的计算方法,计算结果满足精度要求.

(3) 单轴荷载较双圆荷载对土基竖向最大应力、应变之增大比例用旁侧轮系数 ξ 来表示;多轴(双轴和三轴)荷载较单轴荷载对土基竖向最大应力、应变之增大比例用邻轴系数 ζ_n 来表示. 旁侧轮

系数 ξ 及邻轴系数 ζ_n 随着相对深度 ν 的增加而增加。层间接触状态对旁侧轮系数 ξ 及邻轴系数 ζ 的影响不大。

(4) 车辆荷载位于水泥混凝土路面板角隅时, 土基竖向应力、应变最大, 它们较荷载位于板中时的土基竖向最大应力、应变之增大比例可用荷位系数 φ 来表征。水泥混凝土路面的底基层(或基层)与土基层间光滑时的荷位系数 φ 值大于层间连续时的荷位系数 φ 值。

参考文献:

- [1] 姚祖康. 沥青路面结构设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
YAO Zukang. Structural design of asphalt pavements [M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [2] Franco M. Gomez-Ramirez, Marshall Thompson. Aircraft multiple wheel gear load interaction effects on airport flexible pavement response [C]//Advanchg Airfield Pavements. Proceedings of the 2001 Airfield Pavement Specialty Conference. Chicago: American Society of Civil Engineers, 2001: 123-132.
- [3] Warren K A, Howard I L, Brooks J A. Preliminary construction and instrumentation plan for geosynthetic-reinforced flexible pavement test sections[C]//Geo-Frontiers 2005. Austin: Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, 2005: 4091-4096.
- [4] Isaac L H, Kimberly A W. Preliminary analysis comparing measured responses of FWD and traffic data[C]//Geo Congress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of Geo Systems. New Orleans: American Society of Civil Engineerings, 2008: 380-387.
- [5] 廖公云, 路畅, 黄晓明. 沥青路面结构力学相应的分层检测与分析[J]. 东南大学学报, 2010, 40(5): 1061.
LIAO Gongyun, LU Chang, HUANG Xiaoming. Layered measure and analysis of mechanical responses within asphalt pavement [J]. Journal of Southeast University, 2001, 40(5): 1061.
- [6] 朱海波, 贾朝霞, 张宏博, 等. 重载交通下的路基工作区界定问题探讨[J]. 公路交通科技, 2009, 26(1): 39.
ZHU Haibo, JIA Chaoxia, ZHANG Hongbo, et al. Discussion of the definition of subgrade workspace under heavy traffic[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(1): 39.
- [7] Child L D, Nussbaum P J. Pressures at foundation soil interfaces under loaded concrete and soil-cement highway slabs [C]//American Society for Testing and Materials Conference. [S. l.]: American Society for Testing and Materials, West Cohshohocken, 1962: 1243-1263.
- [8] Punya P Khanal, Michael S. Mamlouk. Program BIMODPAV for analysis of flexible pavements [J]. Transportation Engineering, 1997: 43.
- [9] 林小平, 凌建明, 官盛飞, 等. 水泥混凝土路面路基应力水平分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(4): 546.
LIN Xiaoping, LING Jianming, GUAN Shengfei, et al. Analysis on stress level of subgrade under cement pavement [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2010, 38(4): 546.
- [10] 吁新华. 沥青路面等效温度的研究[D]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2011.
YU Xinhua. Study on equivalent temperatures of asphalt pavement [D]. Shanghai: College of Transportation Engineering of Tongji University, 2011.
- [11] 谈至明, 姚祖康. 层状结构顶面当量模量的近似计算[J]. 公路, 2003(8): 5.
TAN Zhiming, YAO Zukang. Approximate calculation of equivalent modulus for the top of layer structure[J]. Highway, 2003(8): 5.
- [11] Lü X H, Huang N, Tong D. Wind tunnel experiments on natural snow drift[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55: 927.
- [12] Iversen J D. Drifting-snow similtude-transport-rate and roughness modeling[J]. Journal of Glaciology, 1980, 26(94): 393.
- [13] Pomeroy J W, Gray D M. Saltation of snow [J]. Water Resources Research, 1990, 36(7): 1583.
- [14] Carrier C F. On slow viscous flow[R]. Providence: Brown University, 1953.
- [15] 李雪峰. 风致建筑屋盖表面及其周边积雪分布研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2011.
LI Xuefeng. Research on snowdrifting on building roof and around building. [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2011.
- [16] Anderson R S, Hallet B. Sediment transport by wind: toward a general model[J]. Geological Society of America, 1986, 97: 523.
- [17] 朱光耀. 公路风吹雪害形成机理与防治[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 2007.
ZHU Guangyao. The formation mechanism of Snowdrift disaster on highway and its control[M]. Haerbin: Heilongjiang Publishing Group, 2007.
- [18] 李岁虹. 稳态风沙运动的物理力学特性研究[D]. 兰州: 兰州大学土木工程与力学学院, 2005.
LI Suihong. Physical and mechanical characteristics of the steady state of sand movement [D]. Lanzhou: School of Civil Engineering and Mechanics of Lanzhou University, 2005.

(上接第 529 页)