

柔性基层沥青路面面层参数对面层畸变能的影响

丁彪,郑传超,王兴平

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘要:为了研究沥青路面面层内部畸变能的变化规律,应用 BISAR 软件分析了柔性基层沥青路面面层的模量、厚度及泊松比等参数对面层畸变能的影响,并比较了不同层间状态下沥青路面面层内部的最大畸变能可能发生的位置。研究表明:增加层间的连续性,提高面层的模量,增加面层的厚度及泊松比,可以有效减小面层的畸变能,从而提高柔性沥青路面的使用寿命;面层畸变能最大值的位置与层间状态有关,当层间状态为连续时,最大畸变能的位置在面层厚度的 $1/3$ 处,当层间状态为光滑时,最大畸变能的位置既可能在面层厚度的 $1/3$ 处,也可能出现在面层底部。分析结果为以最大畸变能理论解释柔性基层沥青路面在车辆荷载作用下的破坏机理及长寿性沥青路面结构设计提供了依据。

关键词:道路工程;柔性基层;畸变能;模量;厚度;泊松比

中图分类号:U411

文献标志码:A

Influence of top layer's parameters of flexible base asphalt pavement on its distortion energy

DING Biao, ZHENG Chuan-chao, WANG Xing-ping

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the variation of distortion energy of asphalt pavement, BISAR software was used to analyze the influence of top layer's parameters of flexible base asphalt pavement such as the modulus, thickness, and poisson's ratio on its distortion energy. Furthermore, the possible places of the maximum distortion energy under different connection states are made a comparison. The results show that improving the continuity between the layers and increasing the top layer's modulus, thickness and Poisson's ratio can effectively reduce the distortion energy, and then extend the service time of the pavement. The position of maximum value of distortion energy is related to the interlayer connection state. When the interlayer connection is continuous, the maximum value place is at one-third of the top layer's thickness; while the interlayer connection is smooth, the maximum value place may either appear at one-third of the top layer's thickness, or at the bottom of the top layer. This study explains the failure mechanism of the flexible base asphalt pavement under the vehicle load from the perspective of maximum distortion energy and it also provides the basis for the perpetual asphalt pavement structure design. 3 tabs, 12 figs, 8 refs.

Key words: road engineering; flexible base; distortion energy; modulus; thickness; Poisson's ratio

0 引言

裂缝是柔性基层沥青路面最主要的损坏形式之一,按照裂缝的产生原因,可以分为荷载型裂缝和非荷载型裂缝,其中荷载型裂缝是由于路面强度不足以承担车辆荷载作用而引起的。对于荷载型裂缝的发展过程,目前有 2 种说法:一是由面层底部向上扩展,即疲劳裂缝。二是起始裂纹发生在路面表面并且向沥青面层内扩展传播,即 Top-down 裂缝。对于 Top-down 裂缝的形成国内外学者进行了大量的研究,毛成认为 Top-down 裂纹是由于低温应力和低温疲劳应力引起的^[1];孙立军通过有限元分析得出轮载下的剪应力是造成 Top-down 裂缝产生的主要原因^[2];易昕基于 Paris 公式采用数值方法分析了疲劳模型参数和路面结构参数对 Top-down 裂缝的影响与疲劳寿命的影响,给出了筑路材料选取与路面结构设计等方面的建议^[3];吕广印采用三维有限元法分析得出,路表产生的拉应力和 Mises 应力是导致 Top-down 裂缝产生的最主要原因^[4];Myers 等提出 Top-down 裂缝可能有多种形式的产生机理,不仅可能从路表开始,也有可能从路表以下一定深度开始,拉伸型和剪切型的裂缝都可能引发 Top-down 裂缝^[5];De 等通过加速轮轨试验和三维非线性粘弹性有限元模型,研究了卡车轮胎接地应力、混合料设计参数以及施工质量对 Top-down 裂缝的影响,研究发现已形成车辙的表面 Top-down 裂缝起裂有显著贡献。关于 Top-down 裂缝出现的相关位置的论述,国内外学者普遍认为沥青路面浅层 10 cm 范围是 Top-down 裂缝主要的扩展区域;有的甚至提出 5~10 cm 是 Top-down 裂缝扩展的主要区域^[7]。综上所述,影响 Top-down 裂缝的形成和扩展的因素大概可以归纳为:荷载、面层参数、施工质量等,其形成位置既可能起于路表也可能距离路表一定深度的范围。在以上研究中,荷载是研究 Top-down 裂缝的重点,学者们已经从温度应力、剪应力等方面来阐述了 Top-down 裂缝的形成机理。但是材料力学第 4 强度理论认为,畸变能是引起材料屈服的主要因素,不论在什么样的应力状态下,只要构件内一点处的畸变能达到材料的极限值,该点处的材料就会发生屈服^[8]。也就是说在荷载作用下,沥青面层内畸变能最大值的位置也就是材料 Top-down 裂缝起裂的位置。因此,弄清楚在垂直荷载作用下柔性基层沥青路面面层内部畸变能的最大值

位置,找出面层参数对面层畸变能的作用规律,在路面结构设计时使用合理的面层参数保证面层的畸变能最小,具有重要意义。为此,本文研究了沥青路面内畸变能的变化规律,比较了不同层间状态下最大畸变能可能发生的位置,为以最大畸变能理论解释基层沥青路面在车辆荷载作用下的破坏机理及长寿性沥青路面结构设计提供依据。

1 面层模量对面层畸变能的影响

路面结构参数见图 1,荷载采用标准单轴双轮组荷载,按圆形均布荷载进行加载,当量圆半径为 0.106 5 m,轮胎接地压力为 0.7 MPa。图中: h_1 、 h_2 、 h_3 分别为各层厚度; E_2 、 E_3 、 E_4 分别为各层模量; ν_1 、 ν_2 、 ν_3 、 ν_4 分别为各层泊松比。

面层: $h_1=20$ cm; $\nu_1=0.25$
基层: $E_2=700$ MPa, $h_2=20$ cm; $\nu_2=0.25$
底基层: $E_3=500$ MPa, $h_3=30$ cm; $\nu_3=0.25$
土基: $E_4=50$ MPa; $\nu_4=0.35$

图 1 各层路面结构参数

Fig. 1 Pavement structural parameters

面层的模量分别采用 1 000、1 100、1 200、1 300、1 400 MPa。计算结果见图 2、图 3。其中: E_1 为面层模量。

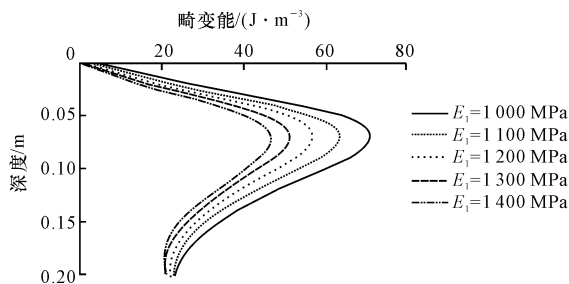


图 2 接触面连续

Fig. 2 Test results on the condition that contact surface is continuous

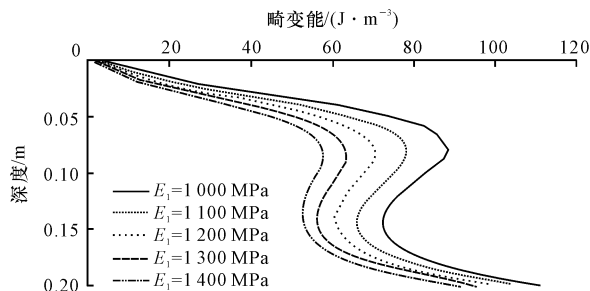


图 3 接触面光滑

Fig. 3 Test results on the condition that contact surface is smooth

由图 1、图 2 可知,面层模量越大,畸变能就会

越小。在 0~0.07 m 深度范围内,畸变能随着深度的增大而增大;在 0.07~0.20 m 深度范围内,畸变能的变化与层间接触状态有关,当层间状态为连续时,面层的畸变能会随着深度逐渐减小,当层间状态为光滑时,面层畸变能首先沿着深度会逐渐减小,然后又逐渐变大。当面层和基层的接触面完全连续时,畸变能最大值的位置在面层厚度的 1/3 处左右,当面层和基层的接触面完全光滑时,畸变能最大值的位置在面层的层底。由此可以得出,畸变能最大值的位置与层间状态有关。对于同一模量,相同深度处,层间接触条件为连续时所对应的畸变能的值小于层间接触面为光滑时的畸变能的值。在面层 0~0.04 m 深度以内,层间状态的改变对畸变能的影响不大,在 0.04~0.20 m 深度范围内,层间状态的不同对畸变能的影响会随着深度增加而增大。

由表 1 和图 4 可以得出,对于层间状态为完全连续和光滑时所对应的路面结构的最大畸变能之间的差值随着面层模量的增大而增大,并且增大速度是逐渐变缓的。因此,可以推出随着面层模量的增加,不同层间状态对畸变能最大值的影响的差异会减小。图中: x_1 为面层模量; y 为最大畸变能差; R^2 为相关系数。

表 1 (相同模量)不同层间状态对应的畸变能最大值及差值

Tab.1 (Same modulus) Maximum distortion energy under different interlayer connection states and their difference

面层模量/MPa	1 000	1 100	1 200	1 300	1 400
最大畸变能(接触面完全连续)/(J·m ⁻³)	70.29	62.13	55.72	50.43	45.97
最大畸变能(接触面光滑)/(J·m ⁻³)	110.7	104.6	99.53	95.16	91.38
最大畸变能(差值)/(J·m ⁻³)	40.41	42.47	43.81	44.73	45.41

2 面层厚度对面层畸变能的影响

路面结构参数见图 5,荷载形式和大小同前。
面层厚度分别采用 20、21、22、23、24 cm。计算结果见图 6、图 7,下页表 2、图 8。
由图 6、图 7 可知,面层厚度越小,畸变能越大。当面层和基层的接触面完全连续时,畸变能最大值的位置大约在 1/3 处,并且面层厚度的变化对畸变能的影响很小;当面层和基层的接触面完全光滑时,在 0~0.07 m 范围内,厚度的变化对畸变能的影响很小,当深度超过 0.07 m 时,面层厚度的变化对畸

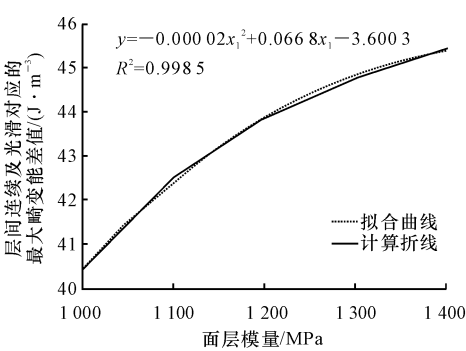


图 4 面层模量与不同层间状态对应的最大畸变能差值的关系

Fig. 4 Relationship between the modulus of surface and the maximum distortion energy difference under different interlayer connection states

面层: $E_1=1\,000\text{ MPa}$; $\nu_1=0.25$
基层: $E_2=700\text{ MPa}$, $h_2=20\text{ cm}$; $\nu_2=0.25$
底基层: $E_3=500\text{ MPa}$, $h_3=30\text{ cm}$; $\nu_3=0.25$
土基: $E_4=50\text{ MPa}$; $\nu_4=0.35$

图 5 各层路面结构参数

Fig. 5 Pavement structural parameters

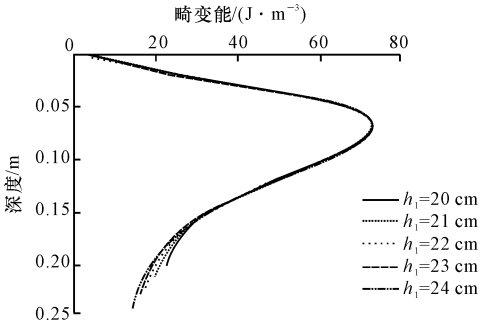


图 6 接触面连续

Fig. 6 Test results on the condition that contact surface is continuous

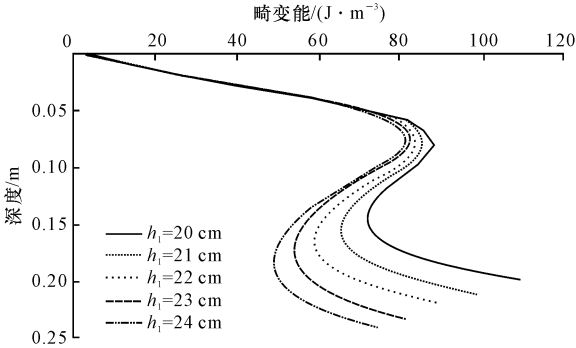


图 7 接触面光滑

Fig. 7 Test results on the condition that contact surface is smooth

变能的影响会随着深度的增大而逐渐增大,并且当面层厚度越厚时,面层底部畸变能的值会越小,此时

畸变能最大值的位置既有可能在层底也有可能面层内部。

表 2 (相同厚度)不同层间状态对应的畸变能最大值及差值
Tab.2 (Same thickness) Maximum distortion energy under different interlayer connection states and their difference

面层厚度/m	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24
最大畸变能(接触面完全连续)/(J·m ⁻³)	70.29	70.89	71.47	72.01	72.53
最大畸变能(接触面光滑)/(J·m ⁻³)	110.70	99.61	89.92	82.67	81.38
最大畸变能(差值)/(J·m ⁻³)	40.41	28.72	18.45	10.66	8.85

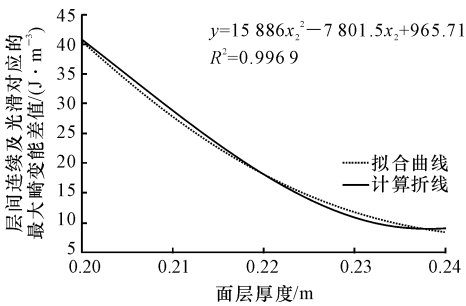


图 8 面层厚度与不同层间状态对应的最大畸变能差值的关系

Fig. 8 Relationship between the thickness of surface and the maximum distortion energy difference under different interlayer connection states

通过比较图 6、图 7 可以得出,在 0~0.07 m 范围内,层间状态为连续及光滑时,相同位置处的畸变能相差不大,当深度超过 0.07 m 时,同一位置处,层间状态为光滑时所对应的畸变能会大于层间状态为连续时的畸变能。

由表 2、图 8 可知,当层间状态完全连续时,畸变能的最大值会随着面层厚度的增加而增大,但幅度极小;而层间状态光滑时,畸变能的最大值则会随着面层厚度的增加而减小;而对于同种厚度条件下,不同层间状态对应的最大畸变能之间的差值和面层厚度随着厚度的增加而递减,并且减小的幅度会随着厚度的增加而变缓。图 8 中 x_2 为面层厚度。

3 面层泊松比对面层畸变能的影响

路面结构参数见图 9,荷载形式和大小同前。
面层的泊松比分别采用 0.15、0.2、0.25、0.30、0.35。计算结果如图 10、图 11 所示。

由图 10 可知,当面层和基层的接触面完全连续时,面层泊松比越大,畸变能会越小,在 0~0.07 m

面层: $E_1=1\ 000\text{ MPa}$; $h_1=20\text{ cm}$;
基层: $E_2=700\text{ MPa}$, $h_2=20\text{ cm}$; $\nu_2=0.25$
底基层: $E_3=500\text{ MPa}$, $h_3=30\text{ cm}$; $\nu_3=0.25$
土基: $E_4=50\text{ MPa}$; $\nu_4=0.35$

图 9 各层路面结构参数
Fig. 9 Pavement structural parameters

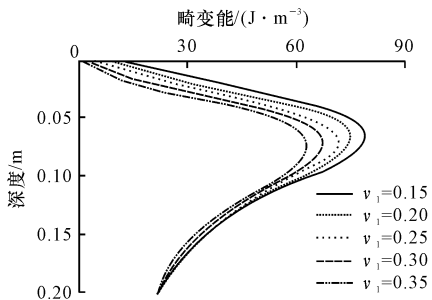


图 10 接触面连续
Fig. 10 Test results on the condition that contact surface is continuous

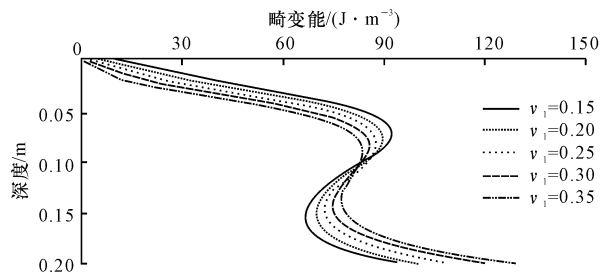


图 11 接触面光滑
Fig. 11 Test results on the condition that contact surface is smooth

深度范围内,这种现象很明显,当超过 0.07 m 时,由泊松比的变化所引起的畸变能的差异会随着深度的增加而逐渐减小。由图 11 可知,当面层和基层的接触面光滑时,在 0~0.07 m 范围内,泊松比越小,畸变能越大;在 0.07~0.16 m 范围内,畸变能随着深度的增大而呈现先减小后增大的趋势,并且泊松比越小,畸变能减小的幅度越大;当畸变能减小到 0.14 m 左右处,畸变能又会随着深度的增加而增大,泊松比越大,面层底部的畸变能就越大。

由下页表 3、图 12 可知,当泊松比增大时,畸变能随着泊松比的增大而增大,接触面连续对应的变大畸变能与接触面光滑对应的最大畸变能的差值会随着泊松比的增大而增大,且具有良好的线性相关性。其中 x_3 为面层泊松比。

4 结 语

(1)面层畸变能最大值的位置与层间状态有关,当层间状态为连续时,畸变能最大值的位置大约在面

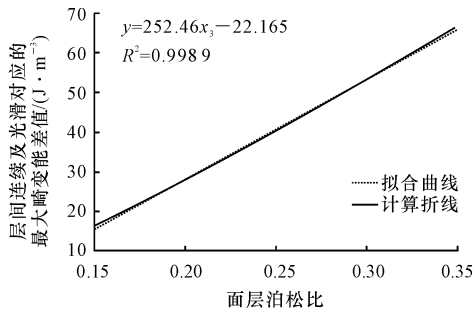


图 12 面层泊松比与不同层间状态对应的最大畸变能差值的关系

Fig. 12 Relationship between the poison’s ratio of surface and the maximum distortion energy difference under different interlayer connection states

表 3 (相同泊松比)不同层间状态对应的畸变能最大值及差值
Tab.3 (Same poison’s ratio) Maximum distortion energy under different interlayer connection states and their difference

面层泊松比	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
最大畸变能(接触面完全连续)/(J·m ⁻³)	78.68	74.66	70.29	66.63	63.11
最大畸变能(接触面光滑)/(J·m ⁻³)	95.12	102.50	110.70	119.80	130.00
最大畸变能(差值)/(J·m ⁻³)	16.44	27.84	40.41	53.17	66.89

层厚度的 1/3 处,当层间状态为光滑时,面层畸变能的最大值位置既有可能出现在面层厚度 1/3 处,也有可能出现在面层的底部。提高层间的连续性有利于降低面层的畸变能,从而提高柔性路面使用性能。

(2)采用较高的面层模量可以降低面层的畸变能。不同的层间状态对应的最大畸变能之间的差值随着面层模量的增大而增大,并且呈现递减的趋势。

(3)当层间状态连续时,面层厚度的变化对面层的畸变能的影响不大,增加面层厚度可以有效降低面层的畸变能。当面层厚度增大到一定的值时,层间状态对面层畸变能的影响就会变小。考虑到修筑道路时的经济性,本文建议面层的厚度采用 0.23 m。

(4)当层间接触连续时,提高面层的泊松比可以减小面层的畸变能,当层间接触状态较差时,采用较小的泊松比可以使面层的畸变能减小。泊松比越大,则不同层间状态对应的最大畸变能的差值越大。

(5)本文仅从理论计算方面分析了垂直荷载作用下柔性基层沥青路面面层畸变能的变化情况,而实际路面受力情况较为复杂。因此,对于复杂荷载作用下沥青路面的面层内部畸变能的变化情况有必要进行更深入的探讨。

参考文献:

References:

[1] 毛 成. 沥青路面裂纹形成机理及扩展行为研究[D]. 成都:西南交通大学,2006.
MAO Cheng. Study on crack initiation mechanism and propagation behavior of asphalt pavements[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)

[2] 孙立军. 沥青路面结构行为理论[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
SUN Li-jun. Theory of behaviors for asphalt pavement [M]. Beijing: China Communications Press, 2005. (in Chinese)

[3] 易 昕. 三维有限元方法分析沥青路面自上而下裂缝的扩展[D]. 长沙:湖南大学,2006.
YI Xin. Analysis of propagation behavior of Top-down crack in asphalt pavement using three dimensional finite element method[D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)

[4] 吕广印. 柔性基层沥青路面 Top-down 开裂机理研究[D]. 西安:长安大学,2008.
LV Guang-ying. Analyses of Top-down cracking in asphalt pavement with flexible base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008. (in Chinese)

[5] Myers L A, Roque R, Ruth B E. Mechanisms of surface-initiated longitudinal wheel path crack in high-type bituminous pavements[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologist, 1998, 67(2): 401-432.

[6] De Freitas E F, Pereira P, Picado-santos L, et al. Effect of construction quality, temperature, and rutting on initiation of Top-down cracking[J]. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1929(3): 174-182.

[7] 张 红. 沥青路面近荷载区 Top-down 裂缝形成机理及扩展规律分析[D]. 西安:长安大学,2011.
ZHANG Hong. Study on Top-down crack formation mechanism and propagation law near load area of asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)

[8] 孙训方. 材料力学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2001.
SUN Xun-fang. Materials mechanics [M]. 4th ed. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)

