

文章编号:1671-6833(2007)04-0096-04

小型构造物上沥青路面结构力学行为研究

薛连旭

(华南理工大学 交通学院, 广东 广州 510641)

摘要: 采用弹性层状体系的力学模型, 利用有限元法和模型试验方法对由于小型构造物存在而导致的路表拉应力进行了详细分析并研究了其结构性能. 结果表明: 由于构造物存在而引起的路表拉应力受构造物顶部填土高度以及基层厚度的影响较大, 而构造物两侧回填压实较为困难, 则是含构造物路面产生病害的主要原因.

关键词: 小型构造物; 沥青路面; 结构性能; 有限元

中图分类号: U 416.221

文献标识码: A

0 前言

由于涵洞、通道等小型构造物台背处的填土压实不当或者受狭小场地的限制, 使得台背填土达不到所要求的压实度, 在行车荷载的反复作用下, 一般都会产生不同程度的差异沉降^[1]. 而且, 与台背填土相比构造物下部基础一般较好, 致使构造物顶部路面的竖向塑性变形几乎为零. 这样就更加剧了台背处路基沉降的不均匀程度. 这种不均匀沉降导致路面平整度降低, 从而引发跳车现象的发生^[2].

笔者拟从结构的角, 对涵洞、通道上的沥青混凝土路面, 在不同的结构组成情况下, 应用有限元数值方法和模型实验方法进行详细研究, 力图得出一些对设计和施工有益的结论.

1 涵洞、通道上沥青混凝土路面结构数值分析

1.1 计算模型

沥青混凝土路面结构的有限元计算模型, 几何尺寸的大小, 通过讨论路面弯沉值的收敛性确定. 边界约束条件为, 土基一定深度处的底面完全固定, 平行于行车方向的两面可自由变形, 垂直于行车方向的两面无水平位移. 各结构层之间完全连续接触. 荷载图式为双圆均布垂直荷载. 整个计算过程在 SurpSAP Alogr93 上实现^[3].

1.2 计算结果

1.2.1 路表弯沉

跨构造物路表弯沉的计算, 涉及到构造物上的填土高度 H 和荷载位置两个参数. 在计算过程中, 将构造物上的填土高度 H 和荷载距构造物对称面的距离 x_p 作为变量, 其余参数取 $E_1 = 1\ 600\ \text{MPa}$, $\mu_1 = 0.25$, $h_1 = 0.16\ \text{m}$; $E_2 = 1\ 400\ \text{MPa}$, $\mu_2 = 0.25$, $h_2 = 0.30\ \text{m}$; 土基变形模量 $E_3 = 40\ \text{MPa}$, $\mu_3 = 0.35$, 构造物弹性模量 $E_c = 33\ 000\ \text{MPa}$, $\mu_c = 0.15$, 平面尺寸 $a = 3.0\ \text{m}$, $b = 2.0\ \text{m}$, $d = 0.3\ \text{m}$. 荷载半径 $\delta = 0.106\ 5\ \text{m}$, 集度 $q = 0.7\ \text{MPa}$. 图 1 中 x_p 为荷载中心到构造物对称面的距离; H 为构造物上的填土高度.

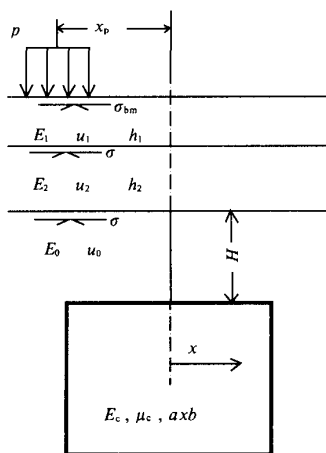


图 1 计算模型

Fig. 1 Calculation model

收稿日期:2007-07-23; 修订日期:2007-10-22

作者简介:薛连旭(1973-),男,山西方山人,华南理工大学博士研究生,主要从事沥青路面的试验研究工作. E-

mail:xuelianxu@139.com

万方数据

图 2 给出了三种不同填土高度情况下路表最大弯沉随荷位的变化关系曲线. 从图中可以看到, 随着荷载偏离构造物的对称面, 路表弯沉逐渐增大, 并且在构造物的外缘处有一明显的拐点. 从远离构造物对称面 3.0 m 后, 曲线变化趋于平缓, 在 4.0 m 处基本收敛于定值 0.460×10^{-3} m, 接近于不含构造物时三层体系的路表弯沉值 0.462×10^{-4} m.

从图 2 中明显可见, 虽然不同的填土高度所表现的路表弯沉化规律一致, 但曲线的斜率不同, 对应的绝对值相差较大. 可见, 由于构造物的存在, 提高了路面基层的整体刚度, 减少了路表弯沉. 随着填土高度的增加, 路表弯沉逐渐增大, 但影响的范围却逐渐减小. 当 H 超过 1.0 m 后, 影响非常小.

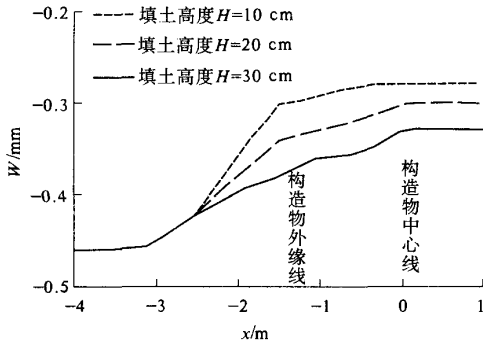


图 2 不同填土高度的路表弯沉

Fig.2 Surface deflection with different fill height

1.2.2 面层和基层的层底应力

沥青混凝土面层的层底拉应力和半刚性基层的层底拉应力, 是进行沥青混凝土路面结构设计的另一主要指标. 由已有计算结果可知, 在普通沥青混凝土路面三层体系中, 若上层与中层的模量比 $E_1/E_2 < 2.0$, 则面层底部处于受压状态, 无拉应力. 仍取上一节的计算参数, 显然 $E_1/E_2 = 1.1428 < 2.0$, 数值计算结果也表明面层底部应力为负, 处于受压状态. 因而不进行讨论.

基层层底应力计算, 仍考虑荷载位置和填土高度的影响, 图 3 给出了荷载位置的变化与基层层底拉应力的关系曲线.

从图中可以看出, 当荷载作用于构造物顶部 ($0.0 \leq x_p < 1.5$ m) 时, 其拉应力 σ_x 值最小, 且曲线变化不大. 当荷载作用于构造物外缘 ($x_p = 1.5$ m) 时, 曲线出现拐点, 并随着 x_p 的逐渐增大, σ_x 值逐渐增加, 最后收敛于定值 0.185 MPa, 与无构造物时的层底拉应力 0.192 MPa, 相差仅万分之一数据

0.07 MPa.

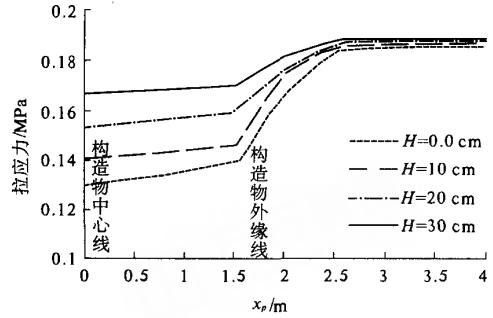


图 3 荷位与基层层底拉应力的关系曲线

Fig.3 Connection between location of load and the stress under base

图 4 为荷载作用于构造物正上方, 不同填土高度时基层底部拉应力. 随着填土高度的增加, 层底拉应力也增加, 并且在 $H \geq 1.0$ m 后趋近于无构造物时的结果. 结合图 3 可见当填土高度很小时, 路面荷载传递到基层上的应力, 大部分由构造物承担. 而当填土高度增大时, 由于基层底下的支撑逐渐变柔, 主要的应力由基层来承担. 图 3 各曲线构造物外侧的拐点充分说明这一点.

1.2.3 构造物顶上面层最大拉应力

当路面跨越构造物时, 由于构造物的刚度远大于两侧土基的刚度, 改变了基层的均匀性, 使得构造物上方的路面, 特别是构造物外缘处的路面附近始终存在一个拉应力区, 对于路面结构十分不利.

①临界荷位及最大拉应力点. 取 $H = 0.1$ m, 变化 x_p , 则得到荷载作用位置与路面表层最大拉应力的关系, 计算表明, 表面最大拉应力 σ_{bm} 随着荷载远离构造物而逐渐增大, 在离对称面 2.3 m (构造物外侧 0.8 m) 处, 达到峰值. 其后随着 x_p 的增加, σ_{bm} 又逐步减小, 在 $x_p = 4.5$ 处基本稳定. 因而取临界荷位 $x_p = 2.3$ m.

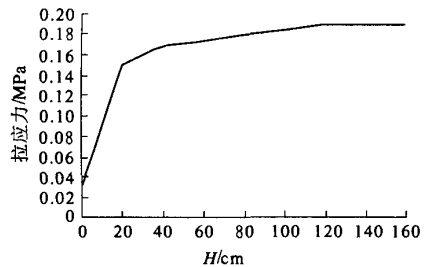


图 4 填土高度对基层层底拉应力的影响

Fig.4 Fill height's infection to stress under base

②填土高度 H 的影响. 为考查 H 对路表拉应力的影响(也考虑构造物深入到基层时的极端情况), 取临界荷载 $x_p = 2.3$ m, 计算不同 H 时的 σ_{bm} , 结果见图 5.

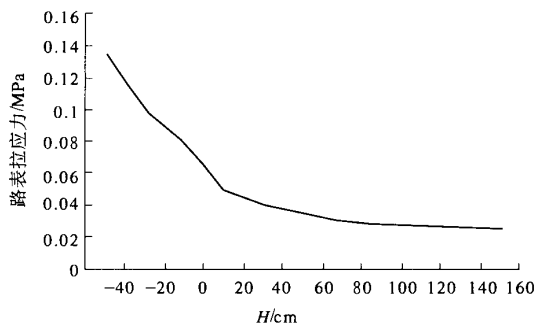


图 5 填土高度与路表拉应力的关系

Fig. 5 Connection between stress in surface and fill height

可见, 随着 H 增大, σ_{bm} 在逐渐减小. 但在 $-0.30 \leq H \leq 0.3$ m, 随 H 的减少, 其值迅速增大. 在 $0.3 \text{ m} < H \leq 0.8$ m, 变化较缓; 在 $H > 0.80$ m 后, 逐渐趋于稳定.

③面层厚度 h_1 的影响. 取填土高度 $H = 0$, $x_p = 2.3$ m. 分别计算不同面层厚度时 σ_{bm} 的值. 结果可见, 当 $h_1 < 0.13$ m 时, 随着面层厚度的减薄, σ_{bm} 值迅速增大, 几乎是厚度每减小 0.1 m, σ_{bm} 平均增加 10%. 但当 $h_1 > 0.13$ m 后, σ_{bm} 的变化趋于平稳. 即厚度再增加与否, 对 σ_{bm} 影响不大.

④基层厚度 h_2 的影响. 在沥青混凝土半刚性基层路面中, 面层为功能层, 基层为承载层. 因而基层厚度的变化将对整个路面结构应力状态的重新分布起决定性作用. 仍取 $x_p = 2.3$ m, $H = 0.0$ m 其余参数不变, 而基层厚度 h_2 分别取 0.0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.18, 0.20, 0.22, 0.25, 0.30 m 9 种情况. 计算结果表明, 随着基层厚度 h_2 的减小, σ_{bm} 几乎呈线性增加. 且每减少 0.01 m, σ_{bm} 增大 8%, 对于 $h_2 = 0$ 的极端情况, $\sigma_{bm} = 0.332$ MPa.

④模量 E_3 、 E_2 、 E_1 的影响. 土基的回弹模量 E_3 和其压实度成正比. 但施工过程中, 在构造物顶部及两侧, 往往是压实的薄弱环节, 很难保证模量 E_3 达到要求. 为分析土基模量变化对表层拉应力的影响, 采用两种计算方案. 一是不同土基模量时, 研究在不同的填土高度情况下, 路面表层最大拉应力 σ_{bm} . 计算结果表明, 当结构物上方存在一定厚度的填土时, 随土基模量的降低, 表层拉应力

有所增加, 但幅度很小. 但是当结构物上方无填土, 甚至于深入到基层中时, 这种影响十分显著. 因而必须特别注意结构物上方无填土、甚至于深入基层时土基模量的控制.

第二种方案是将构造物两侧一定范围内的土层换为底基层材料, 即从构造物底部两侧向外 2.0 m, 并以 45° 坡度向上直到底基层. 计算结果表明, 置换成底基层材料后路表的最大变沉比不置换的减少 46.07%, 比普通无构造物路面减少了 60.27%. 且换填基层材料后, 路表附近的应力分布明显改善. 最大拉应力比无构造物的普通路面降低 34.5%, 比含构造物不置换时降低 47.61%. 最大压应力比无构造物的普通路面降低了 43.43%, 比含构造物土层不置换降低了 39.47%. 更为重要的是缩小了拉应力区的范围.

关于基层模量 E_2 对路表弯拉应力的影响, 仍可以采用上述同样的分析方法. 如取 $E_3 = 40$ MPa, $E_1 = 1\ 600$ MPa, $h_1 = 0.1$ m, $h_2 = 0.3$ m, 填土高度 $H = 0.0$ m, 其余参数不变(实际这种结构很少, 这里仅是为了便于分析). 分别取基层模量 $E_2 = 700, 800, 1\ 600, 1\ 200, 1\ 400$ MPa 进行计算. 结果显示, 随着基层模量 E_2 的减小, 路表拉应力 σ_{bm} 逐渐增加. 从变化幅度可见, 当模量 E_2 在 1 200 MPa 到 1 400 MPa 范围变化时, σ_{bm} 的变化不大, 但从 700 MPa 到 1 200 MPa 范围变化时, 应力相差近 20%. 由此充分说明了作为承载层的基层, 提高其模量值, 对降低路表拉应力十分有利.

为了分析面层模量 E_1 对其表面最大拉应力 σ_{bm} 的影响, 取 $h_1 = 0.10$ m, $h_2 = 0.30$ m, $E_2 = 800$ MPa, $H = 0.0$ m, $E_3 = 40$ MPa, 构造物参数不变. 计算可见, 随着面层模量的逐渐减小, 其表面最大拉应力 σ_{bm} 呈线性减小. 当面层模量从 1 600 MPa 降至 900 MPa 时, σ_{bm} 的值从 0.128 MPa 减至 0.09 MPa, 相差均 30%. 这说明, 对于表面的拉应力 σ_{bm} , 其面层的模量值 E_1 越小, 则越有利. 当然, 过大的 E_2 与过小的 E_1 , 虽对降低表面拉应力有利, 但会使基层底面弯拉应力增大.

⑥构造物尺寸和形状的影响. 高等级公路的涵洞和通道, 为适应过水流量或者交叉道路的等级, 其几何尺寸和形状一般并不固定. 为了研究构造物尺寸对路表拉应力的影响, 取 $E_1 = 1\ 600$ MPa, $E_2 = 1\ 400$ MPa, $E_3 = 40$ MPa, $h_1 = 0.16$ m, $h_2 = 0.30$ m, 而结构的几何尺寸可变. 表 1 给出了计算结果. 从表中可以看到, 构造物的尺寸对路表的最大拉应力 σ_{bm} 值有一定的影响, 但变化幅度很

小,最大不超过1%。可见构造物的尺寸影响可以忽略不计。

表1 构造物尺寸对 σ_{bm} 的影响
Tab.1 Structure dimension's infection to σ_{bm}

编号	尺寸/m			σ_{bm} 0.01 MPa
	a	b	c	
①	3.0	2.0	0.2	8.67
②	1.5	1.0	0.2	8.69
③	2.0	1.0	0.2	8.65
④	6.0	4.0	0.35	8.68
⑤	4.0	3.0	0.3	8.59

1.2.4 构造物外侧路面裂缝对面层应力的影响

构造物的存在,使得路面结构不仅在构造物附近有一个整体刚度的突变,而且更为不利的是在施工过程中,无法保证构造物两侧的回填物达到所要求的压实度,加之行车荷载反复作用,很快在构造物与普通路面连接处的路表面产生差异沉降。随着车轮荷载的反复作用,构造物上方外缘的差异沉降将不断发展,最后导致路面在构造物外缘上方开裂。这种开裂,不仅使原来路面结构的整体性不复存在,而且随着雨水进入裂缝,使之基层,特别是土基软化^[4]。

通过计算,由于裂缝的存在,土基模量降低到原来的50%时,最大弯沉增大8.98%,模量降低到12.5%时,最大弯沉增大了21.94%。

计算还表明,在荷载作用范围附近,有裂缝时的最大主应力 σ_1 小于无裂缝时的最大主应力,但当远离荷载作用区时,有裂缝的最大主应力 σ_1 大于无裂缝的最大主应力。有裂缝的最小主应力值 σ_2 始终小于无裂缝时的值,相差4.26%。当土基发生不同程度软化时,拉应力 σ_x (平行于裂缝)三者差别不大,而拉应力 σ_y (垂直于裂缝)差别很大,且随着地基软化应力值增大。这正说明了为什么随着时间的推移,构造物附近的裂缝逐渐向路线纵向发展的原因。

2 实验研究

2.1 实验原理及模型

实验按照非相似原理进行,模型与实际几何相似比为1:5,材料参数通过测量确定^[5]。

实验在室内试槽中进行,过路构造物用陶瓷圆管模拟,圆管半径分别为 $R=0.15\text{ m}$ 、 $R=0.125\text{ m}$ 。弹性模量 $E=40\ 000\text{ MPa}$,泊松比 $\mu=0.15$ 。用夯实素土代替土基,圆管上填土高度 $H=0.05\text{ m}$ 。基层为0.05 m厚的石灰土,回弹模量 $E_2=264$ 万方数据

MPa;泊松系数 $\mu_2=0.25$ 。沥青混凝土层,用西安红庙坡沥青拌合厂拌制的中粒式沥青混凝土,厚度4 cm。

2.2 测试与分析

荷载为圆形均布,荷载集度0.725 MPa,作用半径0.05 m。分别选定偏离圆管轴线0.2,0.4,0.6,0.8 m 4个位置加荷。

将所测应变及计算的应力值列于表2。从表中可以看出,随着荷载位置对圆管的逐渐偏离, σ_x 值由0.2 m时的-0.058 5 MPa,变为0.8 m时的0.24 MPa。即由压应力变为拉应力,且拉应力值在逐渐增加,这与数值分析所得的规律是一致的。

表2 沥青混凝土路面应力、应变测试值
Tab.2 Tset result of stress and strain
in asphalt pavement

y_p /m	ε_x / $\mu\varepsilon$	ε_y / $\mu\varepsilon$	σ_x /MPa	σ_y /MPa
0.2	-40	-23	-0.058 5	-0.042 2
0.4	-1	-5	-0.002 8	-0.006 7
0.6	15	-1	0.010 8	0.003 5
0.8	19	-1	0.024 0	0.004 8

注: y_p 为荷载中心距管轴线距离

3 结论

(1)构造物对涵洞、通道上的沥青路面结构力学形为存在很大的影响,但随着构造物上方填土高度的增加,影响逐渐减小。当 $H>1.00\text{ m}$ 后,其影响可忽略不计;

(2)由于构造物的存在,使得路表弯沉以及面层和基层层底拉应力均小于无构造物时的情况。在路表附近,从构造物的对称面到距其外缘1.0 m以内,出现一拉应力区,且有:①最大拉应力 σ_{bm} 和构造物上方的填土高度成反比,尤其是在填土高度小于0.30 m范围内,变化较大,应引起注意;②随着面层厚度 h_1 和基层厚度 h_2 的增加, σ_{bm} 减小,并且 h_2 的变化影响大于 h_1 。特别应注意构造物嵌入到基层内($h_2=0.0\text{ m}$)的极端情况;③最大拉应力 σ_{bm} 和基层模量 E_2 成反比,和面层模量 E_1 成正比。但绝不可以通过降低面层的模量 E_1 来减小拉应力 σ_{bm} 。土基模量 E_3 的变化,对最大拉应力 σ_{bm} 的影响仅在构造物上方无填土时表现显著,对于构造物深入基层时,影响最大。

(下转第121页)

- [5] SONG J, BOO K, KIM H S et al. Model development and control methodology of a new electric power steering system [J]. Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering, 967-975.
- [6] 施国标, 林逸, 张昕. 电动助力转向助力特性的若干问题 [C]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 中国
- 汽车工程学会 2003 学术年会, 714-718.
- [7] PEPPLER S A, JOHNSON J R WILLIAMS D E. Steering system effects on on-center handling and performance [J]. SAE Paper No. 1999-01-3765, 2-8.

Study on EPS Assistance Characteristics and Vehicle Tests

SUN Li-jun, CHEN Long, ZHAO Jing-bo, JIANG Hao-bin

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, 212013, China)

Abstract: In order to study the influences of different characteristics of assistance on vehicle steering performance, we established the EPS model based on steering-wheel angle input, and selected the assistance characteristic curve. Also simulations were made to validate the correctness of the established model. At last, full-car experiments using self-designed controller were done. The results show that the self-designed controller can meet the request of steering.

Key words: EPS; assistance characteristic; simulation; full-car experiment

(上接第 99 页)

(3) 构造物两侧回填压实较为困难, 是含构造物路面产生病害的主要原因, 在行车荷载反复作用下, 构造物两侧路面将产生不均匀沉陷, 继而路面开裂, 基层土基逐渐软化, 加速路面结构破坏。如果将构造物两侧的土层用底基层材料置换, 则路面结构性能明显提高, 路表弯沉和拉应力显著降低。

参考文献:

- [1] LUNDVAL J F. Mitigation of roadway settlement above buried culverts and Piper [M]. 1997, FHWA-97/01 (Final Report): 29-32.
- [2] 高速公路丛书编委会. 高速公路路基设计与施工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 21-31.
- [3] 薛连旭. 涵洞、通道上的沥青路面结构研究 [D]. 西安: 西安公路交通大学硕士学位论文, 1998: 3-12.
- [4] 乐金朝, 丁武洋, 谢丽. 路面结构裂缝应力强度因子数值计算 [J]. 郑州大学学报: 理学版, 2002, 23 (2): 41-43.
- [5] BEER M D, KANNEMEYER L, FISHER C. Towards improved mechanistic design of thin asphalt layer surfacings based on actual Tyre/Pavement contact Stress-In-Motion (sim) data in south africa [C]. Capetown: 7th Conference On Asphalt Pavements For Southern Africa, 45.

Study on Mechanic Behavior of Asphalt Pavement Structure on the Small-scaled Structure

XUE Lian-xu

(Road Engineering Research Institute, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Tension stress in asphalt pavement above structure across roadway, such as culvert and underpass, has been calculated by FEM with elastic layered system theory and model test. The results show: tension stress on the surface of the pavement caused by the structure is greatly influenced by the thickness of the basement and the road base above the structure. The main reason of damage in the pavement above structure is that earthworks of the road base can not be well compacted.

Key words: small-scaled structure; asphalt pavement structure; mechanic behavior; finite element analysis