

基于 APBI 对半刚性基层沥青路面分析研究

纪永恒

山东省路桥集团有限公司 山东 济南 250021

【摘要】：本研究基于 APBI 程序对半刚性基层沥青路面结构在复杂力学环境下的响应特性进行了系统性分析，旨在优化结构设计参数并提升其耐久性。通过构建包含沥青面层、水泥稳定碎石基层、级配碎石底基层及土基的多层弹性层状体系模型，结合标准轴载双圆垂直荷载条件，对 20 个计算点位的应力、应变及位移分布进行精细化数值模拟。研究表明：路面位移随深度增加呈递减趋势，表面层最大位移为 0.0095 cm，底基层最小位移为 0.00875 cm，表明荷载变形主要由面层吸收，基层通过模量梯度实现应力扩散；表面层荷载中心区域压应力集中，基层底部因模量差异出现拉应力集中；主应力 1 和主应力 2 以压应力为主，主应力 3 因三轴约束始终为负值，表明半刚性基层对抑制反射裂缝扩展具有关键作用。本研究验证了 APBI 程序在路面力学响应模拟中的高效性与准确性，可为半刚性基层沥青路面结构优化设计提供理论依据，并为长寿命路面技术发展提供科学支撑。

【关键词】：半刚性基层沥青路面；APBI 程序；力学响应；层状体系模型

DOI:10.12417/3083-5526.25.11.003

1 引言

半刚性基层沥青路面作为我国高等级公路的主要结构形式，凭借其高强度、良好的荷载扩散能力及经济性优势，支撑了交通基础设施的快速发展。据统计，我国 90% 以上的高速公路采用半刚性基层沥青路面结构。然而，随着交通量激增与重载车辆比例攀升，此类路面普遍面临反射裂缝、车辙、水损害等早期病害问题，严重制约其服役寿命与使用性能。研究表明，半刚性基层材料的干缩与温缩特性是诱发沥青面层反射裂缝的核心因素，而动态荷载与温度耦合作用下的应力集中进一步加剧了结构损伤^[1]。因此，揭示半刚性基层沥青路面在复杂力学环境下的响应规律，优化其结构设计参数，已成为提升路面耐久性的关键课题。

APBI 程序是一种基于弹性层状体系理论开发的路面结构分析程序，广泛应用于路面结构的力学分析中。它可对不同结构层次的路面在各种荷载作用下的应力、应变和位移等进行计算分析，为路面设计、评估及轴载换算等提供理论支持^[2]。通过建立路面结构模型，输入各层材料参数、荷载参数等，APBI 能快速给出计算点处的力学响应结果，帮助工程师理解路面结构的受力特性，优化设计参数，预测路面结构的使用寿命和性能，从而为路面设计和管理工作提供科学依据，以提高路面结构的可靠性和耐久性。

2 路面结构模型设计

该路面结构的上面层采用沥青玛蹄脂混合料（SMA），具有较强的刚度与抗裂性。该层直接承受车辆荷载，需具备优异的抗滑、耐磨及防水性能。中面层与下面层，均采用沥青混合料，形成连续受力体系。中面层侧重应力过渡，下面层则强化荷载扩散能力，两者协同减少基层应力集中。基层采用水泥稳定碎石，其高强度特性可有效分散面层传递的垂直荷载，并抑制反射裂缝。底基层采用级配碎石作为过渡层，通过柔性变形协调土基与刚性基层的模量差异，同时提升排水性能^[3,4]。

路基标准状态下回弹模量取 110MPa，回弹模量湿度调整系数 K_s 取 0.98，干湿与冻融循环作用折减系数 K_n 取 0.98，则经过湿度调整和干湿与冻融循环作用折减的路基顶面回弹模量为 106MPa。

3 APBI 程序参数设置与计算

3.1 加载条件

标准轴载（100kN）下的双圆垂直均布荷载，各参数如图 1 所示：

标准轴载	BZZ-100
标准轴载 P (kN)	100
轮胎接地压强 p (MPa)	0.70
单轮传压面当量圆直径 d (cm)	21.30
两轮中心距 (cm)	1.5d

图 1 双圆垂直均布荷载参数表

3.2 计算点位模型

基于 APBI 程序采用双圆垂直荷载模型，分别选取了四个计算点位（A、B、C、D）进行分析。四个计算点的 y 坐标分别为 0、-15.975、-2.6625、-26.625；在路面结构中，上面层选取中间层位进行分析，其余层位选择底层进行分析，每层四个点位，共 20 个计算点位。力学响应计算图如图 2 所示。

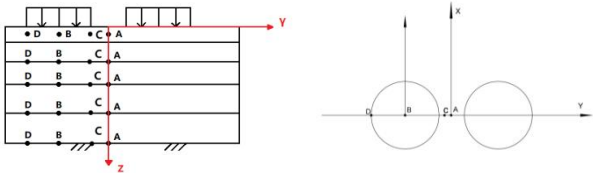


图 2 力学响应计算点位置图

3.3 计算结果

根据半刚性基层沥青路面的设计厚度（单位：cm）、弹性

模量（单位：MPa）、泊松比以及计算点位的详细坐标等参数，输入 APBI 路面结构分析程序对各计算点位进行力学分析运算，得出以下结果：

(1) 位移表

计算点号	位移 (cm)	计算点号	位移 (cm)
1	0.00950	11	0.0094
2	0.01000	12	0.0092
3	0.00954	13	0.0092
4	0.00949	14	0.0091
5	0.0095	15	0.0091
6	0.00962	16	0.009052
7	0.00951	17	0.008866
8	0.00933	18	0.008825
9	0.00941	19	0.008865
10	0.00937	20	0.008754

(2) 总应变表

计算点号	R	T	Z
1	-0.000151	-0.0000705	0.00006709
2	-0.000164	-0.000138	-0.0005508
3	-0.000147	-0.0001117	0.00005903
4	-0.000110	-0.0000898	-0.0002416
5	-0.000002	-0.0001478	-0.0000806
6	0.0000298	0.00002419	-0.0004009
7	0.0000012	-0.0001335	-0.0001077
8	5.443E-07	-0.0000533	-0.0001726
9	-0.000007	-0.0000526	-0.0001242
10	-0.000002	-0.0000100	-0.0002172
11	-0.00000718	-0.0000498	-0.000131
12	-0.00001279	-0.0000281	-0.0001192
13	0.00009349	0.00008345	-0.0000612
14	0.00009006	0.0000767	-0.0000577
15	0.00009339	0.00008327	-0.0000611

16	0.00008443	0.00006515	-0.0000518
17	0.0001093	0.0001035	-0.0001696
18	0.0001069	0.00009759	-0.000164
19	0.0001093	0.0001033	-0.0001695
20	0.000103	0.00008806	-0.0001548

(3) 主应力表

计算点号	主应力 1	主应力 2	主应力 3
1	-0.0073	-0.1064	-0.1645
2	-0.4067	-0.4261	-0.7039
3	-0.0098	-0.172	-0.1779
4	-0.0682	-0.2391	-0.489
5	-0.1033	-0.1724	-0.2315
6	-0.1263	-0.1309	-0.5057
7	-0.1045	-0.156	-0.2675
8	-0.0527	-0.0987	-0.3446
9	-0.0879	-0.1275	-0.1905
10	-0.103	-0.1063	-0.2956
11	-0.0891	-0.1233	-0.2014
12	-0.0313	-0.0817	-0.2392
13	0.2422	0.2261	-0.0054
14	0.2313	0.2099	-0.0051
15	0.2419	0.2256	-0.0054
16	0.2133	0.1825	-0.0047
17	0.0047	0.0046	-0.0035
18	0.0046	0.0043	-0.0035
19	0.0047	0.0045	-0.0035
20	0.0043	0.0039	-0.0034

4 结果分析

4.1 半刚性基层沥青路面位移分析

根据路面结构分析 APBI 程序的计算结果，图 3 展示了计算点位与位移值的变化关系。图像显示，位移值随计算点位深度增加呈递减趋势：表面层位移最大，随着点位向底基层延伸，位移逐渐减小至 0.00875 cm。这一变化表明，路面结构在荷载

作用下表现出明显的分层响应特性，表面层因直接承受外部荷载发生较大变形，而底基层因材料刚度较高和应力扩散的效应，位移显著降低。

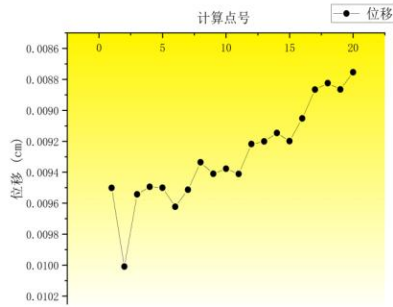


图3 计算点位与位移关系图

4.2 半刚性基层沥青路面总应变分析

根据路面结构分析 APBI 程序的计算结果，总应变随计算点位的变化呈现出明显的分层特征。图4 计算点位与总应变图中显示，水平方向的应变值从表面层的初始值-0.0001512 逐渐增长，至底基层时达到 0.000103，表明应变方向由表层的轻微拉伸逐渐转为底层的显著压缩。同样垂直方向的应变值从 -0.00007052 逐渐增长至 0.00008806，可知表面层的应变多为拉伸应变，底基层的应变多为压缩应变。不同应变方向中，Z 和 YZ 方向的应变变化更为显著，反映了路面结构在垂直和剪切方向上的力学响应差异。

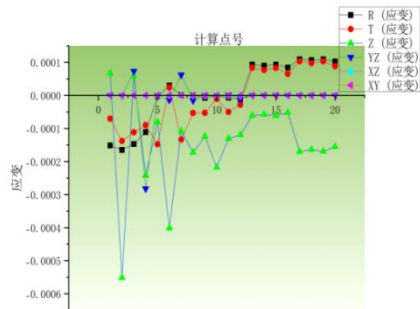


图4 计算点位与总应变图

4.3 半刚性基层沥青路面主应力分析

根据图5 计算点位与主应力图可知，在表层，车辆荷载作用于表面时，2号点主应力1（近荷载中心）压应力最大为-0.4MPa，向着4号点（荷载边缘）逐渐减少。荷载中心区域（点位2）弯曲变形最显著，导致压应力集中；边缘点位4因层间剪切和横向约束部分释放压应力。在中下面层，随着深度

的增加，压应力逐渐减小，点位8和12则因边缘效应仍保持较低压应力。近荷载中心的点位受基层支撑更直接，压应力积累更快；边缘点位因侧向变形空间较大，应力反转较缓。在基层，随着深度和模量的增加，半刚性基层模量较高，与面层模量差异较小，导致弯曲变形时基层底部拉应力更显著。在垂直荷载下会产生横向膨胀趋势，但受土基刚性约束，横向变形被抑制。这种约束将横向膨胀趋势转化为附加压应力，进一步加剧主应力3的负值特性。

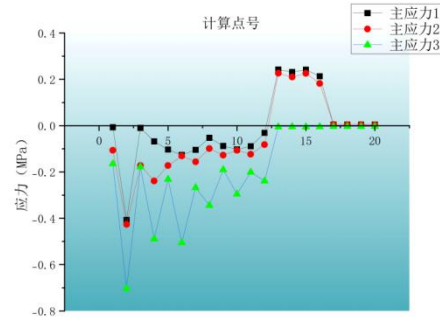


图5 计算点位与主应力图

5 结论

本研究基于 APBI 程序对半刚性基层沥青路面结构在复杂力学环境下的响应特性进行了系统分析，旨在揭示其应力、应变及位移分布规律，为优化结构设计、提升耐久性提供理论依据。通过构建包含沥青面层、水泥稳定碎石基层、级配碎石底基层及土基的多层弹性层状体系模型，结合标准轴载双圆垂直荷载参数，对20个计算点位的力学响应进行精细化数值模拟。研究结果表明：

（1）位移与分层响应特性：路面位移随深度增加呈递减趋势，表面层最大位移为0.0095 cm，底基层最小位移为0.00875 cm，表明荷载作用下结构变形主要由面层吸收，基层与底基层通过模量梯度实现应力扩散，有效降低土基变形。

（2）应力应变分布规律：表面层荷载中心区域压应力最大，边缘点位因剪切效应压应力显著降低；基层底部因模量较高出现拉应力集中。水平方向应变由表层的拉伸逐渐转为底层的压缩，垂直方向应变受荷载传递与层间约束影响，呈现显著的分层差异。

（3）主应力特性：主应力1和主应力2以压应力为主，主应力3因三轴约束始终为负值，表明半刚性基层对抑制反射裂缝扩展具有关键作用。

参考文献：

- [1] 袁江,程怀磊,孙立军,et al.基于温度应力分析的半刚性基层沥青路面拱胀病害成因[J].中国公路学报,2024,37(12):182-96.
- [2] 赵润民,黄晓明.基于沥青道路土基应力参数的轴载换算[J].公路交通科技,2020,37(07):9-16.
- [3] 邢丹,罗晓岚.级配碎石复合式基层沥青路面力学响应研究[J].公路工程,2020,45(03):240-6.
- [4] 王超.半刚性基层沥青路面结构试验研究[D],2010.