

文章编号: 0451-0712(2005)06-0070-06

中图分类号: U416.217.01

文献标识码: B

沥青混凝土路面半刚性基层层底 裂缝断裂力学分析

李思水¹, 汪为奇²

(1. 庐江县交通局县乡公路管理所 庐江县 231500; 2. 安徽省巢湖市公路管理局 巢湖市 238000)

摘 要: 路面裂缝尖端应力强度因子是判断裂缝产生和扩展的重要指标。应用有限元方法, 建立了 8 结点等参单元的有限元模型, 采用奇异等参单元及断裂力学理论, 对路面基层裂缝问题进行了数值分析, 结果能真实反映路面结构基层裂缝扩展的现象和规律, 为高速公路工程设计提供依据。

关键词: 裂缝; 有限元; 断裂力学; 数值分析

基层的疲劳裂缝进而引起沥青混凝土面层破坏, 是高等级沥青混凝土路面的主要破坏模式之一, 为了在理论上研究裂缝产生与扩展的机理, 需要分析裂缝尖端的应力状态。裂缝尖端应力强度因子是判断裂缝扩展的重要指标, 应力强度因子越大, 裂缝越易产生和扩展, 道路的使用寿命就越短。为了掌握裂缝产生和扩展规律, 确定道路的剩余使用寿命, 以便为设计各种防裂措施提供必要的理论依据, 本文将采用有限元模型, 对裂缝尖端的应力状态进行详细分析, 探讨路面结构参数的变化对基层底裂缝的影响规律, 为沥青混凝土路面的结构设计和材料设计提供有益的参考。

1 断裂力学^[1]

1.1 应力强度因子

断裂力学是研究含裂缝的构件在各种环境下(包括荷载作用、温度变化、湿度变化等)裂缝的平衡、扩展和失稳规律, 以及其强度的一门学科。按照它们在荷载作用下扩展形式的不同, 可以分成 3 种基本类型: (1) 张开型裂缝(I 型); (2) 滑开型裂缝(II 型); (3) 撕开型裂缝(III 型)。在道路工程中, 仅涉及到 I 型和 II 型裂缝。

根据线弹性断裂理论, I 型裂缝尖端区域的应力场可表示为:

$$\sigma_x = \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \sqrt{\frac{K}{2\pi r}}$$

$$\sigma_y = \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \sqrt{\frac{K}{2\pi r}}$$

式中: σ_x 、 σ_y 为含裂纹弹性体的应力分量; r 、 θ 是以裂纹尖端为坐标原点的极坐标; K 为常数。

从上式可以看出, 随着 r 的减小(也就是越接近裂缝尖端的地方), 所有的应力分量都增大, 并且当 r 趋向 0 时, 这些应力分量均趋向无限大, 亦即裂缝尖端处的应力场具有奇异性。因裂缝尖端处应力场的奇异性, 故只用应力大小来判断结构强度的方法不适用。由于裂缝尖端附近的应力场与 K 成正比, K 可以用来反映裂缝尖端附近的应力场强度, 被称为应力强度因子。用有限元法求得裂缝尖端的结点位移后, 代入上式即可计算出应力强度因子。

1.2 J 积分

J 积分是为了避开直接计算裂缝尖端附近的弹塑性应力、应变场, 提出了一个围绕裂缝尖端的围线积分, 与积分路径无关, 为一常数, 即 J 积分的守恒性。故它是弹塑性断裂力学中另一个十分重要的参量, 被公认为在其主导区能正确反映 HRR 奇异性, 其守恒性使得可以在分析中避开裂缝尖端这个难以直接严密分析的区域。

如图 1 所示, 围绕裂缝尖端做一回路, 并沿此回路做以下积分:

$$J = \int_r (\omega dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds)$$

式中: ω 是在弹塑性条件下, 在单调加载过程中

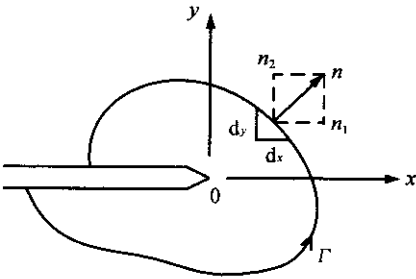


图 1 裂纹尖端积分回路

裂缝体的应变能密度; Γ 是自裂缝下表面的任意一点起, 沿逆时针方向绕过裂缝尖端而止于裂缝上表面任意一点的任意一条曲线; T_i 是作用在回路上弧线 ds 对应的 dx, dy 上表面力矢量; u_i 是该处的位移矢量; n 是线元素 ds 的外法线单位矢量。

2 等参有限元分析

本文根据分析的需要, 把路面结构简化成平面应变模型, 用等参 8 结点四边形单元作为分析的基本有限元单元。

用有限元法求解断裂力学问题时, 应力理论解在裂缝尖端 ($r \rightarrow 0$) 为无界, 也就是说, 裂缝尖端的应力、应变具有奇异性。采用常规有限元, 难以正确反映裂缝尖端应力场的奇异性, 计算结果精度不高。因此, 在裂缝尖端需设置奇异单元^[2], 如图 2 所示, 可以很好地模拟裂缝尖端的奇异性问题, 并且单元也不用划分得那么细, 这大大地减轻了划分网格的工作强度和节约了计算时间。

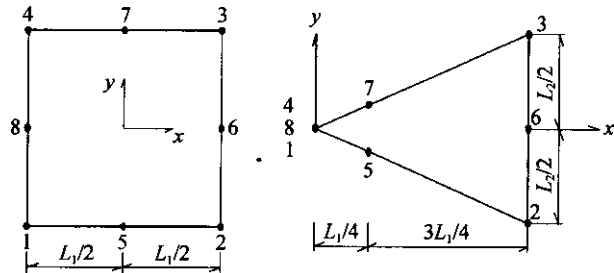


图 2 等参单元和奇异单元

3 高速公路层状路面结构的数值计算模型

由于半刚性基层的强度高、刚度大, 基层底部会出现明显的拉应力区, 在反复荷载作用下, 会导致路面结构层底部出现裂缝, 存在路面疲劳破坏的隐患, 因而, 分析基层底裂缝的应力强度因子很重要。为了讨论基层底裂缝在交通荷载作用下的扩展规律, 取

单圆荷载 ($2 \times 10.65 \text{ cm}$) 作用下的 4 层连续体系作为有限元分析的基本力学模型, 并假设基层底部中有 1 条贯穿于整个宽度的裂缝, 裂缝长度为 2 cm 。考虑 2 种最不利荷载位置如图 3 所示, 其中图 3(a) 为正荷载, 图 3(b) 为偏荷载。由于作用于路面的实际荷载为运动荷载, 总会经历上述正荷载和偏荷载的作用过程, 分析过程中忽略了动荷载效应的影响^[3]。路面结构材料基准参数见表 1。

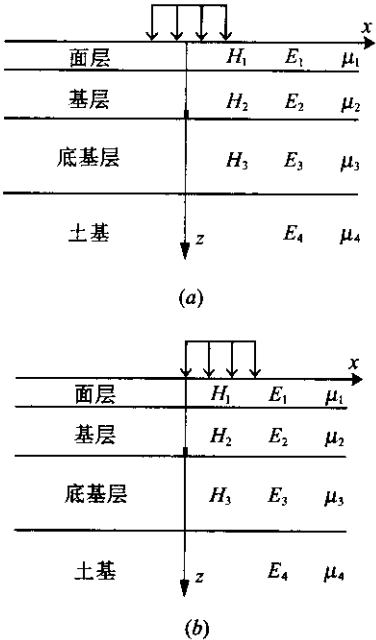


图 3 交通荷载力学模型

表 1 路面及路基结构计算参数

序号	结构层	混合料	厚度 H/cm	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ
1	面层	沥青混凝土	16	1 200	0.25
2	基层	水泥稳定碎石	20	1 500	0.25
3	底基层	二灰土	30	800	0.3
4	土基			40	0.35

在整个计算中做以下基本假定:

- (1) 把基层材料、沥青混凝土和地基考虑成线弹性的各向同性、均匀的材料;
- (2) 层与层之间始终保持完全连接状态;
- (3) 横向裂缝间距是均匀的, 横向裂缝贯穿路面的整个宽度, 且所有裂缝面均为自由面;
- (4) 路面上层表面作用有垂直均布荷载, 在无限远处和无限深处应力及位移均为 0。

4 结果分析

4.1 基层厚度对基层抗裂性能的影响

改变基层的厚度,分别计算了在正荷载和偏荷

载作用下,基层底部裂缝尖端的应力强度因子和 J 积分(图4、图5)。

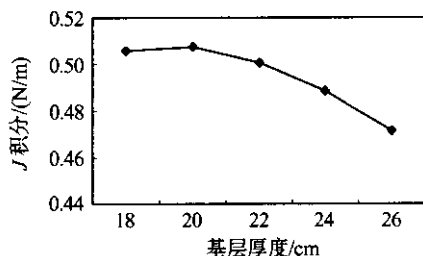
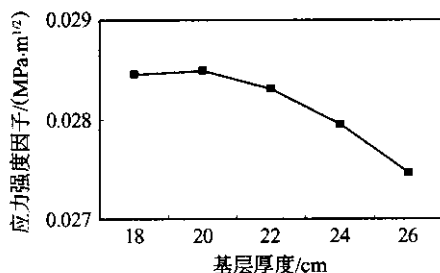


图4 正荷载作用下 H_2 与 K_1 、 J 关系

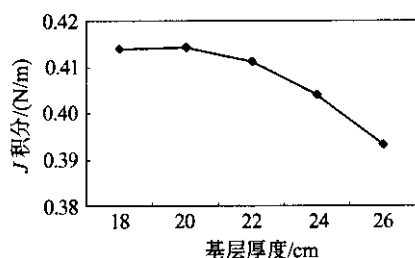
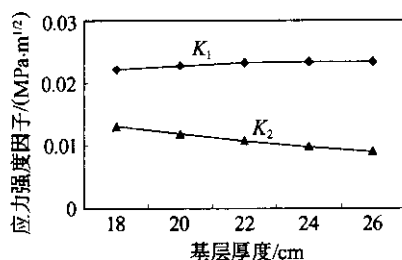


图5 偏荷载作用下 H_2 与 K_1 、 K_2 、 J 的关系

由图4、5可知,在正荷载作用下,随着基层厚度的增加,张应力强度因子 K_1 和 J 积分随之减小,由于荷载对称,此时剪切应力强度因子 K_2 等于0;在偏荷载作用下,随着基层厚度的增加, K_1 开始有所增加,到达一定厚度后又开始下降,而 K_2 是一直减小,由于 J 积分是一直减小,说明了裂缝尖端的应力强

度是随着基层厚度的增加而减小的。可见,增加基层厚度可以减轻基层的开裂程度。

4.2 基层模量对基层抗裂性能的影响

改变基层的模量,分别计算了在正荷载和偏荷载作用下,基层底部裂缝尖端的应力强度因子和 J 积分(图6、图7)。

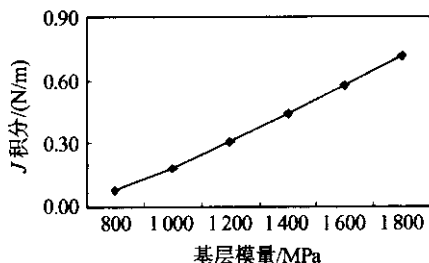
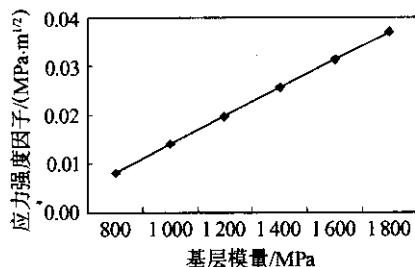


图6 正荷载作用下 E_2 与 K_1 、 J 的关系

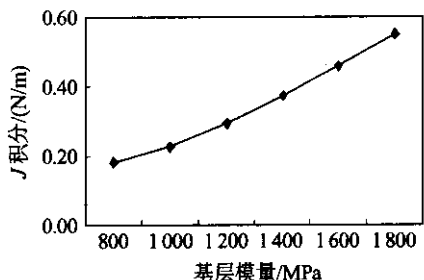
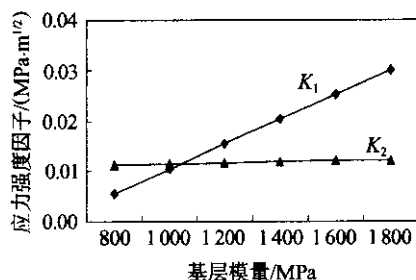


图7 偏荷载作用下 E_2 与 K_1 、 K_2 、 J 的关系

可以看出,在正荷载作用下, K_1 和 J 积分随着基层模量的增加而呈线性增加的趋势;在偏荷载作用下,基层模量对 K_2 的影响很小,但 K_1 和 J 积分则随着基层模量的增加而增大。因此,结构设计时基层模量不宜过大,基层模量愈大愈易开裂。

4.3 面层厚度对基层抗裂性能的影响

改变面层的厚度,分别计算了在正荷载和偏荷载作用下,基层底部裂缝尖端的应力强度因子和 J 积分(图 8、图 9)。

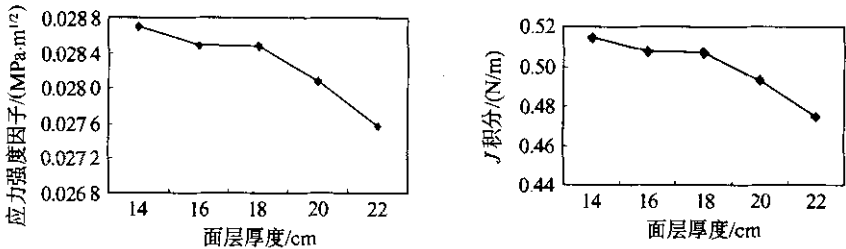


图 8 正荷载作用下 H_1 与 K_1 、 J 的关系

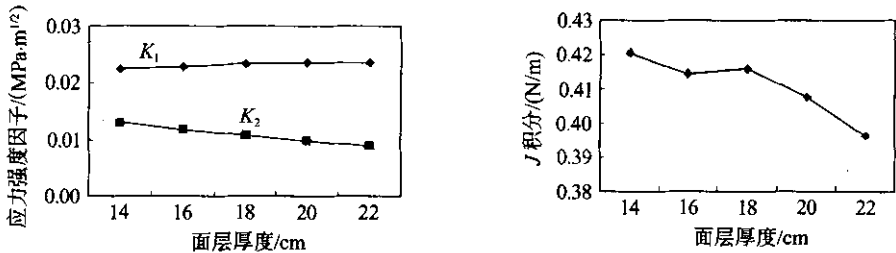


图 9 偏荷载作用下 H_1 与 K_1 、 K_2 、 J 的关系

从图 8、9 中可以看到,在正荷载作用下,随着面层厚度的增加, K_1 和 J 积分随之减小;在偏荷载作用下,随着面层厚度的增加, K_1 开始有所增加,到达一定厚度(20 cm)后又开始下降,而 K_2 和 J 积分都是一直在减小。因此,增加面层厚度有助于抑制基层

裂缝的扩展。

4.4 面层模量对基层抗裂性能的影响

改变面层的模量,分别计算了在正荷载和偏荷载作用下,基层底部裂缝尖端的应力强度因子和 J 积分(图 10、图 11)。

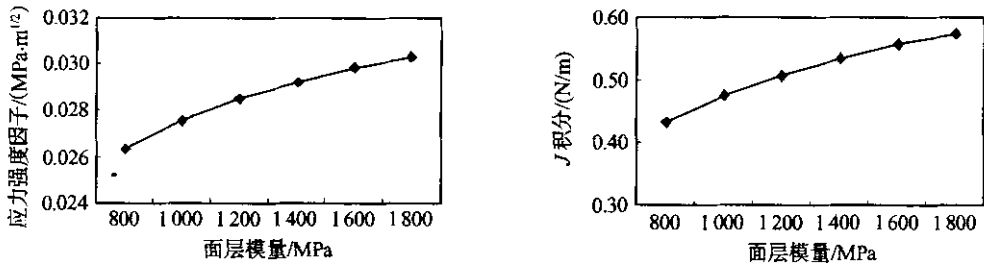


图 10 正荷作用下 E_1 与 K_1 、 J 的关系

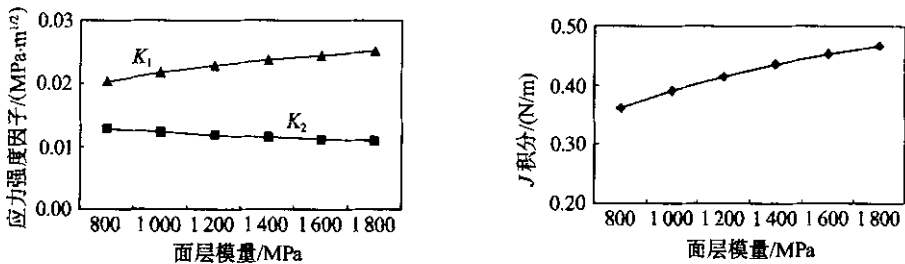
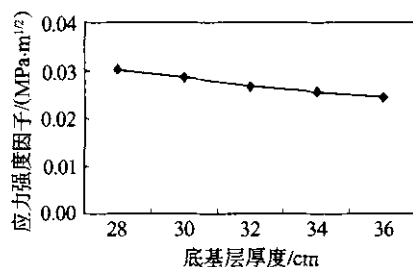
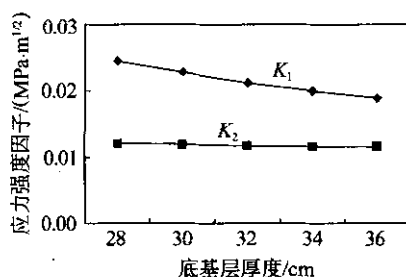
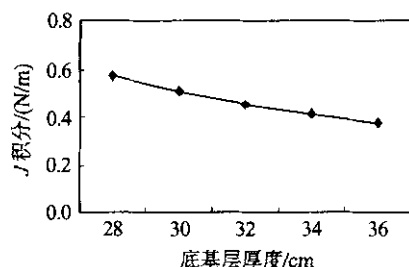
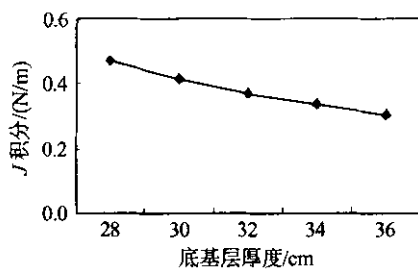


图 11 偏荷载作用下 E_1 与 K_1 、 K_2 、 J 的关系

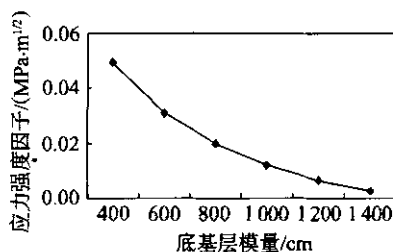
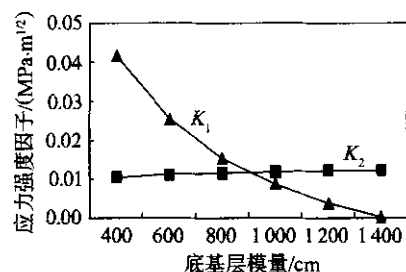
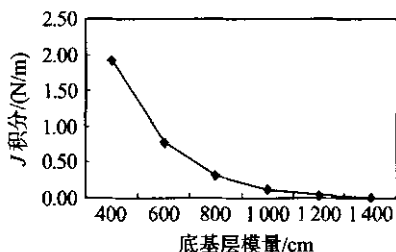
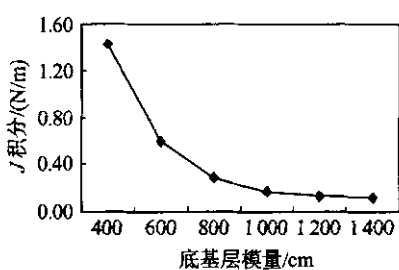
由图10、11可见:在正荷载作用下, K_1 和 J 积分随着面层模量的增加而增加;在偏荷载作用下, K_2 随着面层模量的增加而减小, K_1 和 J 积分则随着面层模量的增加而增大。故面层模量增加将可能增大基层底部裂缝扩展的可能。

图12 偏荷载作用下 H_3 与 K_1 、 J 的关系图13 偏荷载作用下 H_3 与 K_1 、 K_2 、 J 的关系

由图12、13可见,在正荷载作用下,随着底基层厚度的增加, K_1 和 J 积分随之减小;在偏荷载作用下,底基层厚度对 K_2 的影响很小,而 K_1 和 J 积分则随着底基层厚度的增加而减小。适当增加底基层厚度有助于降低基层裂缝的扩展。

4.6 底基层模量对基层抗裂性能的影响

改变底基层的模量,分别计算了在正荷载和偏荷载作用下,基层底部裂缝尖端的应力强度因子和 J 积分(图14、图15)。

图14 正荷载作用下 E_3 与 K_1 、 J 的关系图15 偏荷载作用下 E_3 与 K_1 、 K_2 、 J 的关系

由图14、15可见,在正荷载作用下, K_1 和 J 积分随着底基层模量的增加而减小,但底基层模量增加到一定程度(800 MPa)后降低的幅度将大幅减小;在偏荷载作用下,底基层模量对 K_2 的影响很小, K_1 和 J 积分则随着底基层模量的增加而减小,趋势和正荷载作用下的情况相同。因此,设计底基层模量值不必太高,建议取为600~800 MPa。

4.7 不同基层裂缝长度时的应力强度因子

通过计算不同基层裂缝长度时的应力强度因子与 J 积分值,来模拟裂纹扩展过程中应力强度因子

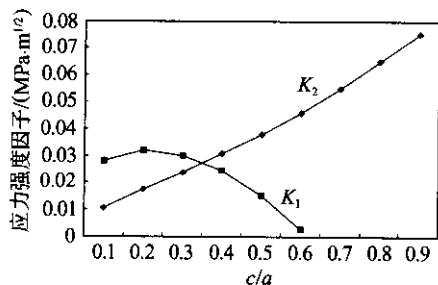


图16 偏荷载作用下不同基层裂缝长度时的 K_1 、 K_2 、 J

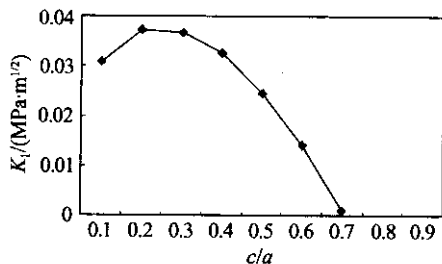
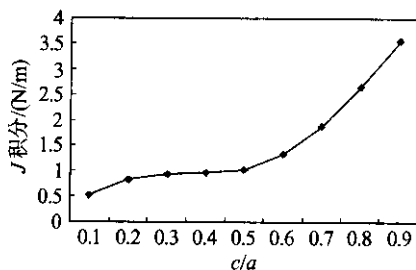


图17 正荷载作用下不同基层裂缝长度时的 K_1

5 结语

数值分析的精确程度,依赖于本构模型的真实性和边界条件选取的合理性以及计算参数选取的准确性等。本文用8结点等参单元有限元法对沥青混凝土路面半刚性基层层底裂缝进行断裂力学分析,

及 J 积分的变化规律。从图16、图17可见(c/a 是裂缝长度与基层厚度的比值),无论是在正荷载还是在偏荷载作用下,随着裂缝的扩展, K_1 均是先增加到一个峰值后再减小,而 K_2 则是一直随着裂缝的扩展而不断增大。从中可以看到, K_1 只是在裂缝扩展初期起一定作用,而主要控制裂缝扩展的是偏荷载作用下的 K_2 ,尤其是在裂缝扩展的后期。从 J 积分图还可以明显看出:裂缝扩展初期, J 积分值变化较小,因此,裂缝扩展速度较慢;到了后期 J 积分值增加很快,裂缝的扩展速度将急剧增加,直至破坏。

结果能真实反映层状路面结构基层裂缝扩展现象和规律,可以为高速公路工程设计的安全性判别和方案的优化决策提供依据。进一步的工作可以从建立三维模型及增加材料的非线性方面分析,以便更为准确地模拟道路的实际情况。

参考文献:

- [1] 沈成康. 断裂力学[M]. 上海:同济大学出版社,1996.
- [2] ABAQUS/Standard User's Manual Version 6.0 [M]. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, 2002.
- [3] 郑健龙,周志刚,张起森. 沥青路面抗裂设计理论与方法[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [4] 常崇义,李生. 高速公路层状路面结构的数值分析[J]. 公路,2002,(8).

甘肃王达高等级公路竣工通车

日前,甘肃甘南藏族自治州王格尔塘至达久滩二级公路改建工程顺利通过了由甘肃省交通厅组织的竣工验收小组的验收,被评为优良工程。

王达公路全长47.23 km,全线按照山岭重丘二级标准设计,设计时速为40 km,于2001年9月开工建设,总投资11 403万元。路线从国道213线K239+533处与省道312线交叉,沿大夏河逆流而上,穿越驰名中外的安多古刹藏传佛教拉卜楞封院,最后到达夏河桑科草原。

王达高等级公路的竣工通车,将彻底打开甘肃旅游业的南大门,为促进甘肃少数民族地区经济快速发展起到重要的推动作用。