

柔性枕梁处治路基纵向裂缝的结构分析

李忠凯¹, 裴建中², 胡长顺², 王秉纲²

(1. 路桥集团第二公路工程局技术研发中心 西安市 710065;

2. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室 西安市 710064)

摘 要: 基于路基纵向裂缝的特点和处治难度, 利用土工格栅和级配碎石各自的优良性能, 提出了柔性枕梁处治技术。通过有限元分析, 研究了不同荷载位置、裂缝宽度、路基侧向滑移和不均匀变形等 4 种情况下, 处治路基结构的受力特点; 进而对柔性枕梁处治结构的各设计参数, 如柔性枕梁的模量、厚度、宽度及调整层厚度等, 进行了力学分析, 推荐了合理的使用范围。

关键词: 纵向裂缝; 柔性枕梁; 结构设计

土工合成材料具有优良的性能, 能够形成多种结构并能适应复杂的条件, 近年来, 倍受工程人员的青睐。在水利、冶金、电力、石油、海港、机场和公路领域的许多大型工程中, 采用土工合成材料均取得了良好的效果, 显示了广阔的应用前景。道路工程中常用的土工合成材料包括土工膜、土工布、土工格栅和土工格室。其中, 土工格栅具有强度高、延伸率低、与土体咬合能力好的特点, 在需要加筋处治的结构中, 一般首选土工格栅。但是在实践中也发现, 土工格栅

仅在平面方向范围内具有很高的强度和抗变形能力, 而在厚度方向上, 土工格栅呈现了厚度薄、轻而柔弱的特性。然而, 在纵向裂缝处治中, 尤其对于较宽的裂缝, 不仅要求其在平面方向能抗拉, 而且要求在厚度方向上能抗折, 起到桥联裂缝的作用。

通过探索, 将土工格栅与碎石综合使用, 形成整体, 以发挥各自的优良性能, 将此土工格栅内包碎石的组合体命名为柔性枕梁, 如图 1 所示。这 2 种材料价格便宜、结构简单、施工方便, 便于规模化应用。

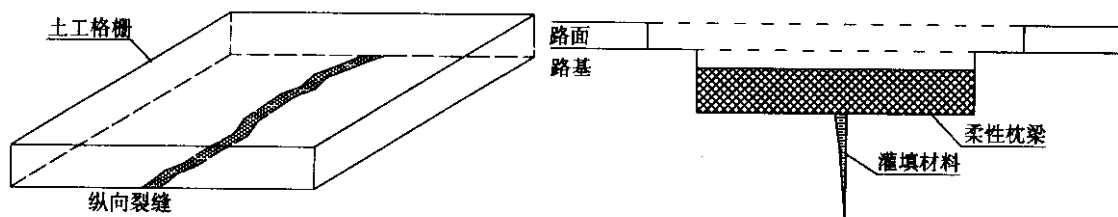


图 1 柔性枕梁构成示意

路基纵向裂缝处治时, 将路面和路基开挖, 用灌填材料填隙后, 在裂缝上面放入柔性枕梁, 之后按原路面结构回填。这种结构的关键是柔性枕梁的形成, 土工格栅和碎石材料必须符合结构设计和材料要求。

1 柔性枕梁结构及其计算模型

1.1 计算模型

对于柔性枕梁结构计算模型, 是假定基层下出现一条贯穿路基且具有一定宽度的裂缝, 并认为纵

向裂缝贯穿整个土基深度且传荷能力完全丧失, 但面层、基层完好, 即为图 2 所示的三维模型。

1.2 边界条件及计算参数

对图 2 所示计算模型采用有限元法计算, 有限元计算时土基底面边界条件设为完全固定面, 没有任何水平位移和垂直位移; X 轴方向和 Y 轴方向的边界水平方向位移为 0。

为防止土体对柔性枕梁产生拉应力, 在柔性枕梁左、右两侧与土体之间设置了 1 种界面单元——

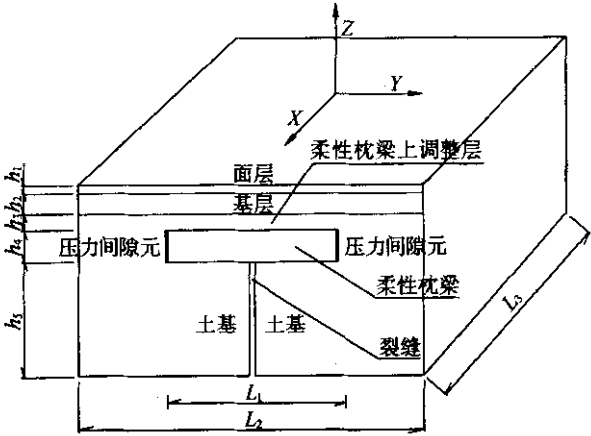


图 2 模型尺寸示意

压力间隙元,这种单元只能承受压力而不能承受拉力。压力间隙元的弹性模量对计算结果有影响,但当模量大到一定程度后对计算结果影响很小。经试算,确定压力间隙元的弹性模量为 6.0×10^5 MPa。

路基填料回弹模量取为 20~80 MPa;面层为沥青混凝土,弹性模量为 1 200~1 600 MPa;基层为水泥稳定碎石,弹性模量为 1 300~1 700 MPa。

对于由土工格栅包裹碎石形成的柔性枕梁结构,为了计算方便,将其简化为各向同性的弹性层。关于柔性枕梁结构的弹性模量,可以采用下述方法综合确定。柔性枕梁模量的下限应该比柔性枕梁包裹的级配碎石高,一般情况下级配碎石模量为 350 MPa,可作为柔性枕梁模量的下限;柔性枕梁弹性模量上限取值,理论上不会比水泥稳定碎石基层模量大,计算中取 1 500 MPa,作为柔性枕梁弹性模量上限取值。因此,综合考虑,将柔性枕梁的弹性模量定在 350~1 500 MPa 之间。最后选用的计算参数见表 1。

表 1 材料参数

结构层	弹性模量 E $\times 10^3$ MPa	泊松比 μ
面层	1.2~1.6	0.25
基层	1.3~1.7	0.25
柔性枕梁	0.35~1.5	0.25
路基	0.02~0.08	0.3

1.3 计算荷载

荷载位置施加在结构层中可能产生最大应力的位置,分别为荷载位置 1(裂缝顶部对称加载)、荷载位置 2(柔性枕梁端部对称加载)、荷载位置 3(裂缝顶部偏载)及荷载位置 4(柔性枕梁端部偏载)4 种可能

情况。

1.4 模型尺寸及单元划分

经有限元收敛性试算与分析,最后选定的模型主要尺寸见表 2。

表 2 计算模型尺寸

位置	尺寸/cm	位置	尺寸/cm
h_1	5	h_5	600
h_2	20	L_1	160
h_3	15	L_2	900
h_4	30	L_3	900

注:表中符号意义如图 2 所示。

2 处治路面结构的力学分析

2.1 荷载位置影响分析

对 4 种荷载位置分别进行有限元分析,计算结果见表 3。

表 3 不同荷载位置时基层应力变化 kPa

荷载位置	$\sigma_{x\max}$	$\sigma_{y\max}$	$\tau_{yz\max}$
荷载位置 1	374.0	292.3	161.1
荷载位置 2	394.1	333.9	198.3
荷载位置 3	377.2	299.4	209.6
荷载位置 4	388.4	318.5	241.6

计算结果表明,当荷载作用在荷载位置 2 时,基层内 $\sigma_{x\max}$ 和 $\sigma_{y\max}$ 均达到最大值,其所在点坐标均为 (0 m, 0.8 m, -0.25 m)。产生这种情况的主要原因是柔性枕梁的设置,使处治部分的结构强度与稳定性均优于正常的路面结构,使有可能再次产生裂缝的位置转移到柔性枕梁端部。

2.2 裂缝宽度影响分析

实际路基纵向裂缝宽度大小变化不一。计算时裂缝宽度取为 2 cm、5 cm、10 cm 及 30 cm,计算结果如图 3 所示。

基层应力及面层最大弯沉均随裂缝宽度的增加而增大,但增加幅度较小,当裂缝宽度由 2 cm 增加到 30 cm 时,基层应力及路面最大弯沉的平均增长率均小于 8%。这说明柔性枕梁对纵向裂缝的处治效果较好,在纵向裂缝宽度条件下,柔性枕梁能在很大程度上消除裂缝对路面结构的影响,不会导致路基纵向裂缝反射到路面结构。

2.3 土基侧向滑移变形影响分析

假设无任何荷载作用时,在模型裂缝线左侧,柔性枕梁底面以下所有土基结点上施加方向向左的位

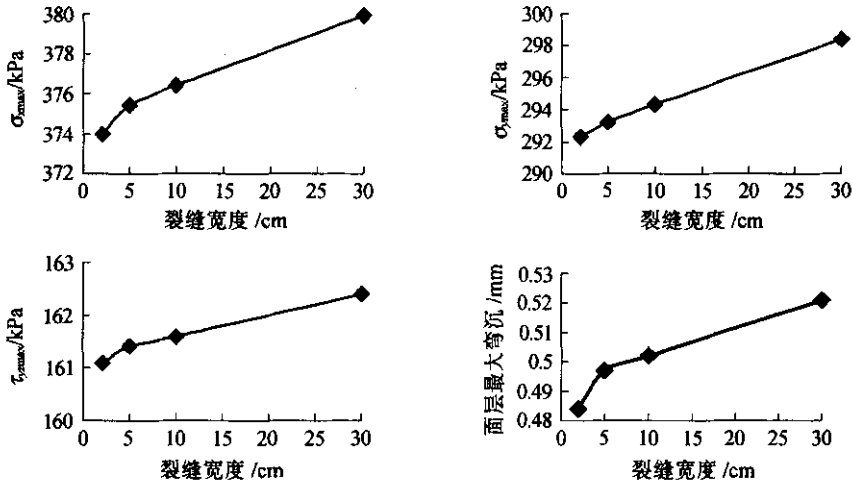


图 3 不同裂缝宽度的基层应力及面层最大弯沉

移边界条件,模拟土基侧向滑移。计算结果如图 4 所示。

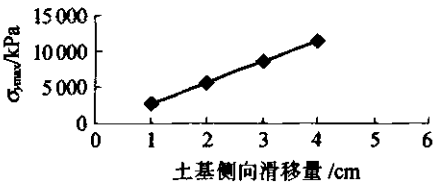


图 4 土基侧向滑移时柔性枕梁内应力

土基侧向滑移时柔性枕梁内应力计算结果表明,柔性枕梁内应力随土基单侧滑移量的增加线性增大,而且增大幅度较大。因 σ_{ymax} 均出现在柔性枕梁底部,即土工格栅上,所以当土基侧向滑移约 4 cm 时,柔性枕梁底部 σ_{ymax} 即超过土工格栅抗拉强度。由此说明,柔性枕梁能够满足一般的变形要求。

2.4 路基不均匀沉降变形影响分析

假设无任何荷载作用时,在模型裂缝线左侧,柔性枕梁底面以下所有土基结点上施加向下的位移边界条件,模拟土基不均匀沉降,计算结果如图 5 所示。

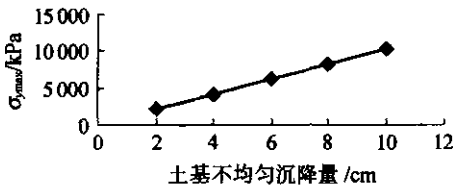


图 5 土基不均匀沉降时柔性枕梁内应力

由图 5 可以看出,柔性枕梁内应力随土基不均匀沉降量的增加线性增大,而且增大数值较大。因 σ_{ymax} 均出现在柔性枕梁底部的土工格栅层,所以当土基不均匀沉降量达到约 10 cm 时,土工格栅层内 σ_{ymax} 才有可能超过土工格栅抗拉强度。

3 处治结构设计参数研究

3.1 柔性枕梁模量影响分析

柔性枕梁的模量主要取决于土工格栅的强度、变形性能和级配碎石的强度,但并不是两者的简单叠加。在分析柔性枕梁的模量对结构应力及变形的影响时,将柔性枕梁的模量分别取为 350、700、1 100 和 1 500 MPa。计算结果如图 6 所示。

计算结果表明,在荷载作用下基层应力及面层最大弯沉随柔性枕梁模量的增加而减小。当柔性枕梁的模量由 350 MPa 增加到 700 MPa 时, σ_{ymax} 随之由 352.6 kPa 减小到 339.1 kPa,平均减小率为 3.8%;柔性枕梁模量由 700 MPa 增加到 1 100 MPa 时, σ_{ymax} 由 339.1 kPa 减小到 332.7 kPa,平均减小率为 1.8%。这说明柔性枕梁在实际运营过程中能起到扩散荷载、防止反射裂缝的作用,如果能够保证施工质量,使柔性枕梁充分发挥整体作用,则能达到明显的效果。

3.2 柔性枕梁宽度影响分析

在分析柔性枕梁宽度对结构应力及变形的影响时,柔性枕梁宽度分别取 80 cm、120 cm、160 cm 及 200 cm。计算结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出,基层应力及面层最大弯沉随柔性枕梁宽度的增加而减小,但数值变化相对较小,当柔性枕梁宽度由 80 cm 增加到 200 cm 时,基层应力及面层最大弯沉的平均减小率均小于 4%。这说明柔性枕梁宽度的增加对基层受力及提高结构整体强度有利,但是改善幅度并不十分显著。因此,出于经济性的原因,在实际处治过程中柔性枕梁宽度不宜过大,除非有其他的考虑,一般柔性枕梁宽度取

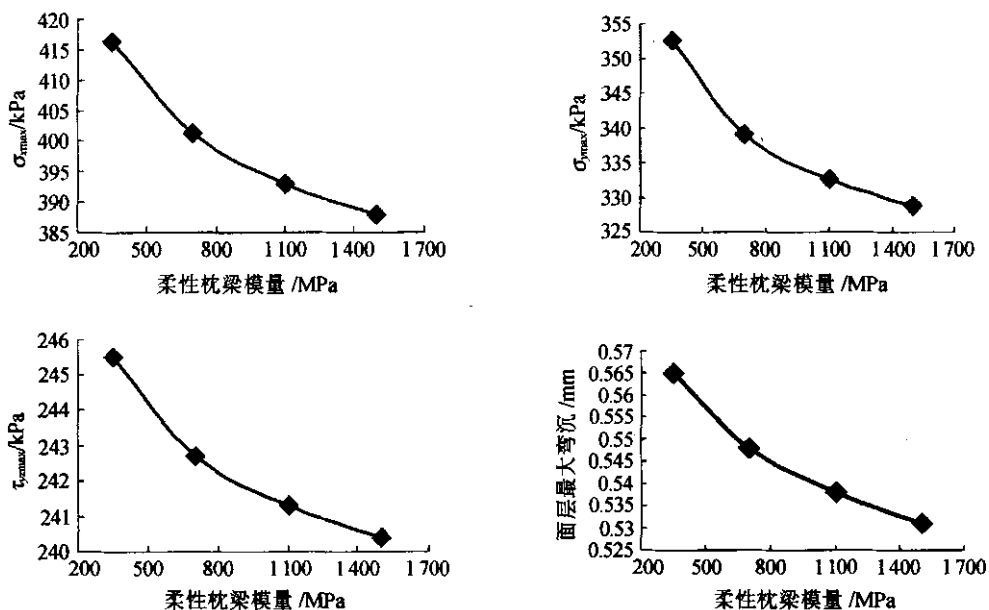


图 6 不同柔性枕梁模量的基层应力及面层最大弯沉

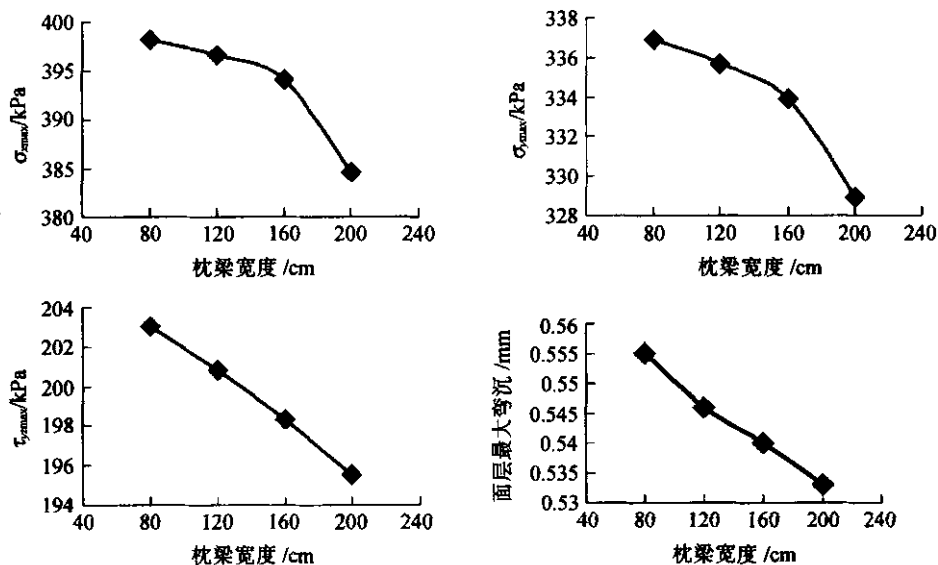


图 7 不同柔性枕梁宽度的基层应力及面层最大弯沉

为 1.2~2.0 m。

3.3 枕梁厚度影响分析

分析柔性枕梁厚度对结构应力及变形的影响时,将柔性枕梁厚度分别取为 10 cm、20 cm、30 cm 及 40 cm。计算结果如图 8 所示。

上述计算结果显示,基层应力及面层最大弯沉随柔性枕梁厚度的增加而减小,但数值变化较小,而且当柔性枕梁厚度大于 30 cm 时,基层应力 $\sigma_{y_{max}}$ 及面层最大弯沉的变化趋于平缓。当柔性枕梁厚度由 30 cm 增加到 40 cm 时, $\sigma_{y_{max}}$ 由 333.9 MPa 减小到 333.7 MPa,平均减小率小于 0.1%。这说明柔性枕

梁厚度的增加对基层受力及提高结构整体强度效果非常有限。出于经济性的考虑,柔性枕梁厚度不宜过大。在实际处治设计时,柔性枕梁厚度不应超过 40 cm,一般取为 30 cm 左右。

3.4 柔性枕梁上调整层厚度影响分析

柔性枕梁上调整层厚度分别取 0 cm、5 cm、10 cm、15 cm 及 20 cm,以计算柔性枕梁上调整层厚度对路面结构的影响。

由图 9 计算结果可以看出,基层应力随柔性枕梁上调整层厚度 h_3 变化而变化。当 $h_3=0$,即柔性枕梁与基层相连接时,基层应力的数值最小;当 h_3

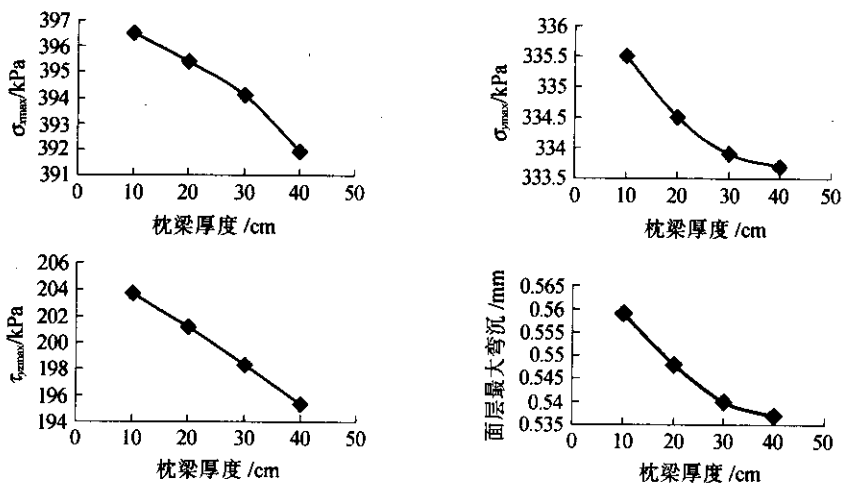


图 8 不同柔性枕梁厚度的基层应力及面层最大弯沉

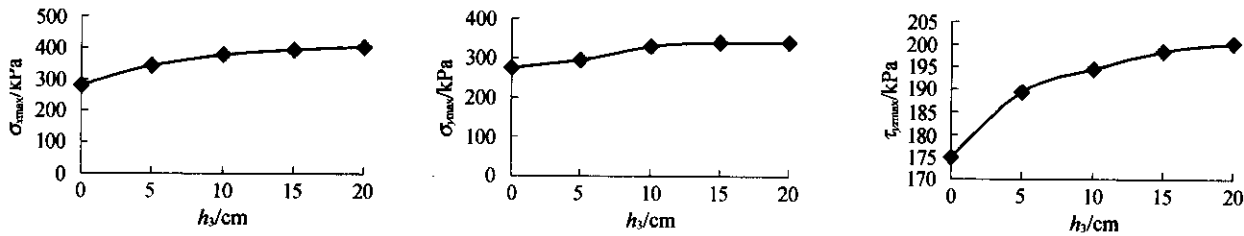


图 9 柔性枕梁上调整层为不同厚度时的基层应力

数值逐渐变大,即柔性枕梁逐渐远离基层时,基层内剪应力数值增加较快,而后逐渐趋于平缓。这说明单从荷载作用的角度,柔性枕梁直接铺设在基层底部时对受力及提高结构整体强度有利。但是从另外一个角度考虑,当路基存在不均匀沉降变形时,柔性枕梁上调整层厚度对基层应力有一定影响,如图 10 所示。

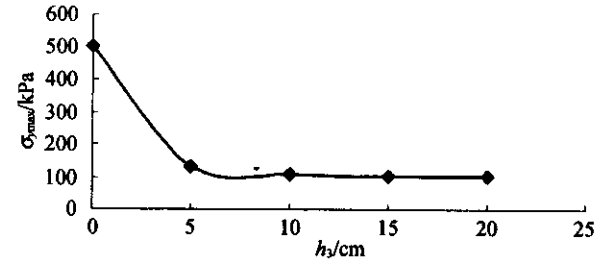


图 10 柔性枕梁上调整层为不同厚度时的基层应力

由图 10 可以看出,当土基不均匀沉降量为一定值时,基层应力随 h_3 的增加而减小,特别是当柔性枕梁位置由 $h_3=0$ (柔性枕梁紧贴基层底面) 变化到 $h_3=5$ cm 时,基层应力值的减小量很大,平均减小率为 70.8%;当柔性枕梁位置由 $h_3=5$ cm 变化到 $h_3=20$ cm 时,基层应力值减小幅度很小,平均减小率为 7.8%。这说明枕梁与基层间的调整层是保证结构在路基不均匀沉降时保持稳定的必要条件。但调

整层的厚度过大时荷载应力又将增加,考虑到施工压实方面的原因,综合确定调整层的厚度宜为 15~20 cm。

4 结语

- (1)经柔性枕梁处治纵向裂缝的路面基层应力及面层最大弯沉随裂缝宽度的增加有增大的趋势,但增幅较小,说明柔性枕梁处治结构对纵向裂缝的处治效果较好,能够有效防止基层在裂缝处的应力集中现象,并且柔性枕梁能够适应宽度较大的裂缝。
- (2)在荷载应力分析的同时,考虑路基变形的影响,计算结果表明,土基侧向滑移及不均匀沉降对路面结构的受力及变形都有很大的影响,基层应力及变形随土基侧向滑移及不均匀沉降量的增加呈线性增长。

(3)对于柔性枕梁的设计参数,计算结果显示,柔性枕梁模量越大对基层受力越有利;柔性枕梁宽度及厚度在常用范围内对计算结果的影响很小,可以忽略,但考虑到纵向裂缝的曲折程度及施工方面的原因,柔性枕梁宽度宜为 1.2~2.0 m,厚度宜为 30 cm 左右;柔性枕梁上调整层厚度对计算结果有一定影响,计算结果表明,柔性枕梁与基层间的调整

层是保证结构在路基变形时保持稳定的必要条件,再考虑到施工的方便性,柔性枕梁上调整层的厚度宜取为 15~20 cm。

参考文献:

[1] 王勋成,邵敏.有限单元法基本原理和数值方法(第二版)[M].北京:清华大学出版社,1995.
[2] 黄晓明,朱湘.公路土工合成材料应用原理[M].北京:人民交通出版社,2001.
[3] JTJ/T 019—98,公路土工合成材料应用技术规范[S].

[4] 石名磊,战高峰,邓学钧.高路堤路面结构纵向裂缝分析[J].吉林工业大学学报,1999,129(4).
[5] 王善勇,等.地铁开挖对地基沉降影响的数值分析[J].东北大学学报(自然科学版),2002,129(9).
[6] 王国林.高填土公路路堤的稳定性分析[J].岩土工程学报,1994,116(1).
[7] 孙均,等.新型土工材料与工程整治[M].北京:建材工业出版社,1998.
[8] 何光春.加筋土工程设计与施工[M].北京:人民交通出版社,2000.

A Study of Structural Design of Treated by Subgrade Longitudinal Cracks

LI Zhong-kai¹, PEI Jian-zhong², HU Chang-shun², WANG Bing-ang²

(1. Research Centre of Technology, Second Highway Engineering, RBG, Xi'an 710065, China;

2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Due to the characteristics and difficulties of subgrade longitudinal cracks, a flexible beam (FB) technique is put forward. Through the FEM analysis, the strength laws of pavements under different loading sites, crack widths, side slippage and asymmetry deformation are studied; in addition, the design parameters including modulus, thickness, width and adjusting layer of the FB are analyzed, and the useable range of each parameter are also recommended.

Key words: longitudinal crack; flexible beam; structural design



• 简讯 •

龙浩高速公路企业智能电子管理系统通过专家评审

中国交通工程学会于 2005 年 3 月 29 日在广东汕头主持召开了“龙浩高速公路企业智能电子管理系统”课题评审会。专家们审阅了研制报告、技术资料,听取了课题组汇报和查新报告,观看了系统功能录像演示并听取了用户报告。经讨论,一致同意以下评审意见:

(1) 该管理系统提供了对高速公路企业进行信息化管理的手段,覆盖了相应企业业务上的主要环节,本课题立项正确、及时。

(2) 该系统通过采用 B/S 结构、java 技术、J2EE、MVC 模式等先进的软件方案,解决了在高速公路管理信息系统中进行流程自定义、分布式计算等技术难点,将分散的业务环节整合为统一的业务流程,提供了一个高速公路企业管理日常运作的先进的、成熟的解决方案。该系统在总体技术上居于目前国内同类应用软件系统的领先水平。

(3) 该系统是目前国内高速公路较成熟的有实际使用价值的企业智能电子管理系统。该系统在高速公路行业推广应用后将产生明显的经济效益和社会效益。

(4) 建议课题组进一步完善该系统,使其在更大范围内推广应用。