

文章编号:1671-8879(2007)06-0039-05

路桥过渡段路基加固体的拓扑优化

俞永华¹, 谢永利², 杨晓华²

(1. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100101; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:应用拓扑优化理论,采用简化的假定条件,基于应变能最小即刚度最大原理,对路桥过渡段路基加固体的结构布置形式进行了优化。通过分析荷载模式、填高、加固长度和面积等因素对最优拓扑图形的影响,得出了路桥过渡段路基加固体的最优布置方式。拓扑优化结果表明:路桥过渡段路基加固的不同区域对结构刚度的贡献排序为,固定端附近区域—中间偏上区域—中间偏下区域—路基顶面远端区域;上长下短的倒梯形布置形式的结构刚度最大,其抵抗地基沉降变形的能力最强,表明目前桥头常用的倒梯形布置形式具有理论上的合理性;路基加固体底面布置长度应不小于 2 m,由下向上斜率应缓于 1:1。

关键词:道路工程;路桥过渡段;路基加固体;拓扑优化;结构布置形式

中图分类号:U213.15 **文献标志码:**A

Topology optimization of reinforced subgrade body at transition section between bridge and road

YU Yong-hua¹, XIE Yong-li², YANG Xiao-hua²

(1. China Highway Engineering Consultant and Supervision Group, Beijing 100101, China;

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

Abstract: Through the application of topology optimization, on the basis of the principle of the least strain energy equivalent to the most stiffness, the structural disposal form of reinforced subgrade body at the transition section between bridge and road is optimized. Through analyzing the influence factor of the optimization topology figure such as load mode, filling height, reinforced length and area, the best disposal form is received. The result of topology optimization shows that the contribution to advance the structure stiffness by reinforced region of subgrade is as the following sequence: the region around the fixed point, the upper region, the underside region, the region far from the fixed point. The disposal form of converse trapezoid has the most stiffness and the best capacity of resisting the foundation settlement. The underside disposal length is not less than 2 m and the slope from underside to top surface is not more than 1:1. 4 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; the transition section between bridge and road; reinforced subgrade body; topology optimization; structural disposal form

收稿日期:2006-09-20

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200131881259)

作者简介:俞永华(1977-),男,浙江绍兴人,高级工程师,博士,E-mail:yuyonghua1977@163.com。

0 引言

桥头跳车现象产生的根本原因是由于桥台构筑物与路堤刚度的巨大差异引起的。因此,假若使桥台构筑物与路堤的刚度差在桥头路堤的一定范围内得到渐变,使得变形差在这一范围内趋缓,且保证渐变后的任何一点刚度差不致引起跳车,就能达到消除桥头跳车的目的。这就是台背设计的“刚柔过渡”思想^[1-2]。“刚柔过渡”思想虽然从理论上为解决桥头跳车奠定了基础,但由于桥台与路堤刚度相差悬殊,因此,从真正意义上实现两者的刚柔过渡,显然在技术和经济上都是行不通的^[3]。

工程设计人员在总结工程实践经验的基础上,并结合感性认识,在布置路桥过渡段路基加固体时,通常采用倒梯形的加固方式^[4],但其缺乏相应的理论支撑。如何将路桥过渡段路基处治方式的设计由“感性”变为“理性”,在满足技术可行性的同时,实现对材料的最合理利用,对于更好地指导工程实践具有重要意义。综合技术和经济两方面的要求,可以认为,最合理的路基加固方式应是在一定加固面积约束条件下实现抵抗荷载和变形的能力最强^[5-6]。为此,本文基于连续体的结构优化理论和上述加固目的,采用简化的假定条件,应用拓扑优化理论,针对路桥过渡段路基加固体进行结构布局优化。

1 拓扑优化基本理论

与传统的优化设计(尺寸优化)不同的是,满足一定功能要求的结构拓扑具有很多种甚至无穷多的形式,而且这种拓扑形式难以定量描述或参数化(即因变量的优化)。同时,由于需要设计的区域预先是未知的,更增添了问题求解的难度。但另一方面,通过结构拓扑优化可以得到结构的最优布局。拓扑优化的目标是寻求物体对材料的最佳利用,此目标判据(如整体刚度、自振频率等)要求在给定的约束(如体积减小)条件下取得最大或最小值。拓扑优化的标准方法是在给定结构体积 V 的约束条件下,定义问题为结构柔度最小,结构柔度最小等价于整体结构刚度最大。

通常采用的连续体拓扑优化方法主要包括变厚度法、均匀化法和变密度法。本文通用程序采用的是以伪密度为设计变量的变密度法进行拓扑优化。变密度法是连续体拓扑优化的常用方法,属于在基结构基础上的材料描述方法。其基本思想是引入一种假想的密度可变材料,给基结构中每个有限元单元

赋予内部伪密度。当单元密度 $\rho_i = 0$ 时,表示该单元无材料,单元删除;当单元密度 $\rho_i = 1$ 时,表示该单元有材料,保留或增加该单元。优化时以材料密度为拓扑设计变量,使结构拓扑优化问题转化为材料的最优分布问题。选择变形能作为目标函数,以结构柔顺度最小,即整体刚度最大为设计目标,通过施加体积约束来限制材料的使用。

材料物理参数如许用应力和弹性模量与材料密度间的关系也是通过经验公式人为假定的。假定密度 ρ 与材料特性的非线性关系为

$$\left. \begin{aligned} E &= \rho^{\alpha} E_0 \\ \nu &= \nu_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: E 为材料的弹性模量; ν 为泊松比; 下标 0 代表实际使用材料的材料特性; $\alpha > 1$ 。

拓扑优化的变密度方法的数学模型^[7] 为

$$\left. \begin{aligned} \rho &= (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) \\ E_{\min} &= \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} f_i u_i d\Omega + \sum_{i=1}^n \int_{\Gamma} t_i u_i d\Gamma \\ \text{s. t. } M_j &= \sum v_i \rho_i \leq V_0 - V^* \text{ (或 } V_0(1 - \Delta)) \\ \epsilon &\leq \rho_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \\ \rho_i &= 1 \quad (i = J_1, J_2, \dots, J_n) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; E_{\min} 为最小变形能; f_i 、 t_i 分别为作用在初始结构上的体积力和面积力; u_i 为单元位移; M_j 为净质量; v_i 为单元体积; V_0 为给定初始结构材料质量的上限; V^* 、 Δ 分别为优化时指定去除的质量或去除质量的百分比; ϵ 为单元密度下限; J_1, J_2, \dots, J_n 为优化后单元密度保持不变的单元号; Ω 为体积; Γ 为表面积。

2 计算模式

拓扑优化考虑体积约束和结构平衡方程,以结构的柔顺度最小,即刚度最大为目标,得到的最优拓扑抵抗变形的能力最强。而路桥过渡段路基加固的目的是消化地基沉降变形、过渡桥台与路堤的刚度差,采用的加固体布置方式也要求抵抗变形的能力最强,故拓扑优化和工程设计人员的目标一致。因此,利用拓扑优化方法可以得到路桥过渡段加固体的初步布置形式。在此基础上,针对具体的处治措施,进行相关设计参数优化,才能得到最优设计方案。

2.1 拓扑优化计算模型

考虑计算容量和收敛精度,将路桥过渡段简化为平面模型,建立如图 1 所示的拓扑优化基结构。

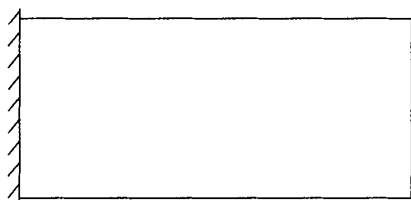


图1 路桥过渡段拓扑基结构

计算参数:路堤填土的 $E = 50 \text{ MPa}$, $\nu = 0.35$, 容重 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ 。

位移边界条件:桥台处固定,其他边结点不约束。

载荷边界条件:由于土体为散粒材料,不能承受拉应力,故路桥过渡段路基加固体区域以外的路基体无法消化地基沉降,其沉降值为路基变形与地基沉降之和。从变密度法的机理来看,由于单元的物理参数与密度存在一假定关系,因此在加固区域以外,单元密度为0,其模量 E 值也接近0,故可认为此区域不能承受荷载。另外,从荷载和变形的对应来看,越靠近桥台,路基的沉降变形值要求越小,故可认为其承受荷载的能力也越强。实际中,桥头处由于汽车的冲击荷载也加大了其路基顶面的荷载值。因此,路桥过渡段加固体基结构的载荷布置方式一方面是桥头实际荷载情况的反映;另一方面也取决于桥台与路基沉降差的过渡长度要求。这样,取路桥过渡段路基加固体基结构顶面的荷载为梯形布置,冲击系数取1.4,桥台处均布荷载值 $p = 42 \text{ kN/m}$,过渡区域末段 $p = 30 \text{ kN/m}$ 。

2.2 拓扑优化定义及过程控制

定义一个载荷工况下的结构柔顺度为拓扑优化函数,函数名为 COMP。将 COMP 指定为优化计算的目标函数,将结构的名义总体积 VOLUME 指定为约束函数。选择优化判据法(OC)的优化算法,定义迭代精度为 10^{-4} ,优化迭代次数为20次。

计算结果输出后,定义最优拓扑图形的密度阈值为0.2。当密度值大于0.2,视为有效加固区域;当密度值小于0.2,则该区域为不需要加固区域。

3 拓扑优化结果

3.1 4 m-8 m-6 m

4 m-8 m-6 m:4 m 为路基高度;8 m 为计算长度;6 m 为荷载作用长度。

图2为填高4 m、长度8 m、不同荷载作用时的最优拓扑图。图2中白色代表单元密度为0的区域,表示此区域不需要加固;深黑色代表单元密度为1的区域,表明该区域对刚度的贡献最大,为有效加

固区域;其他颜色在0~1之间,可酌情增减。从图2中可以看出,不同荷载作用下最优拓扑差异较大。体力荷载作用下的最优拓扑图沿高度中心线上下对称,如两个对称的梯形叠加,上下边长为2.3 m,中间长度为5.7 m;面力荷载作用下则为倒梯形,下边长1.6 m,上边长6 m,最优拓扑图形由下向上割线斜率为1:1.1;面力荷载和体力荷载作用下最优拓扑介于两者之间,其基本形状为倒梯形,下边长度增加到2 m,上边长6 m,但路基顶面离固定端较远一块区域的密度在0~1之间,表明该区域对结构刚度的贡献较小。同时,图形由下向上割线斜率近似为1:1,故荷载布置形式是影响路桥过渡段最优拓扑图形的主要因素。从桥头荷载情况出发,应选用图2(c)的荷载作用形式。因此,在路基填高4 m的情况下,路堤加固体底面长度应大于2 m,斜率应小于1:1。

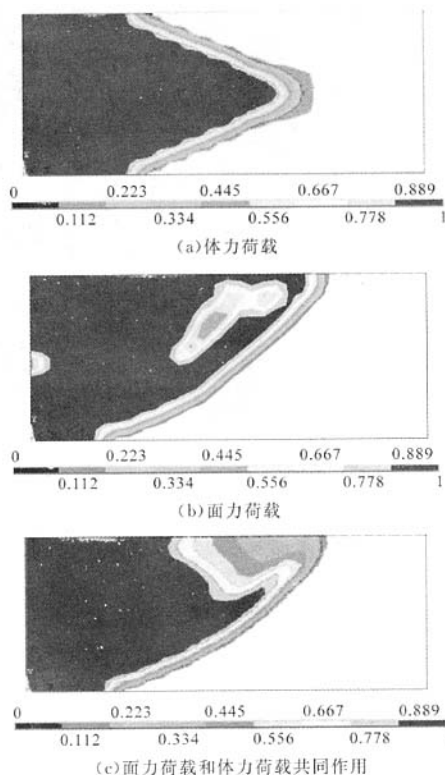


图2 不同荷载作用下的最优拓扑图(单元密度)

3.2 6 m-10 m-8 m

6 m-10 m-8 m:6 m 为路基高度;10 m 为计算长度;8 m 为荷载作用长度。

图3为路堤填高6 m、面力荷载作用长度8 m、加固面积不同时的最优拓扑图。从图3中可以看出,基结构的最优拓扑是结构体力荷载和面力荷载

共同作用的结果,路基顶面面力荷载的作用区域是影响顶面加固长度的主要因素。但由于体力荷载的作用,顶面离固定端较远一块区域的密度在 0~1 之间,而中间部位的密度为 1,表明该区域对结构刚度的贡献低于加固体中间部位。随着加固面积的增加,加固区域向外扩展,但中间区域的长度变化不大,主要是上下两段加固长度的增加。因此,加固体对结构刚度的贡献排序为:固定端附近区域—中间偏上区域—中间偏下区域—路基顶面远端区域。当加固面积为 60% 时,最优拓扑的密度值除路基顶面很小区域(小于 1)外,其他区域均为有效加固区域。此时,最优拓扑图形呈倒梯形。

图 3(a)中,加固体底边长度为 1.9 m;图 3(b)中,底边长度为 2.3 m;图 3(c)中,底边长度为 2.8 m。此时,加固体路基接触边斜率最大,其割线斜率为 1:0.9。

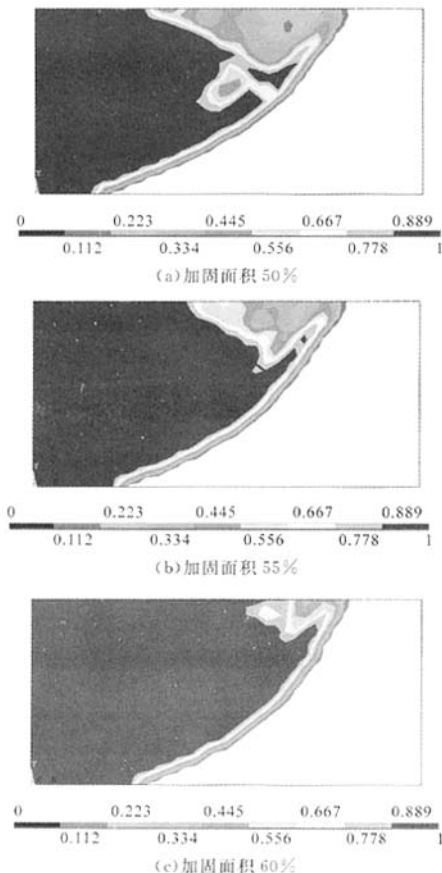


图 3 6 m-10 m-8 m 最优拓扑图(单元密度)

3.3 6 m-10 m-10 m

6 m-10 m-10 m: 6 m 为路基高度;10 m 为计算长度;10 m 为荷载作用长度。

图 4 为面力荷载作用长度 10 m 的最优拓扑图。与图 3 相比可以看出,随着面力荷载作用长度的增加,相应的加固体顶面长度也增加,但路基顶面离固定端较远区域对刚度的贡献相对较小。随着加固面积的增加,加固区域向外扩展,加固体上下两边的长度增加,最优拓扑图形更趋于倒梯形分布。

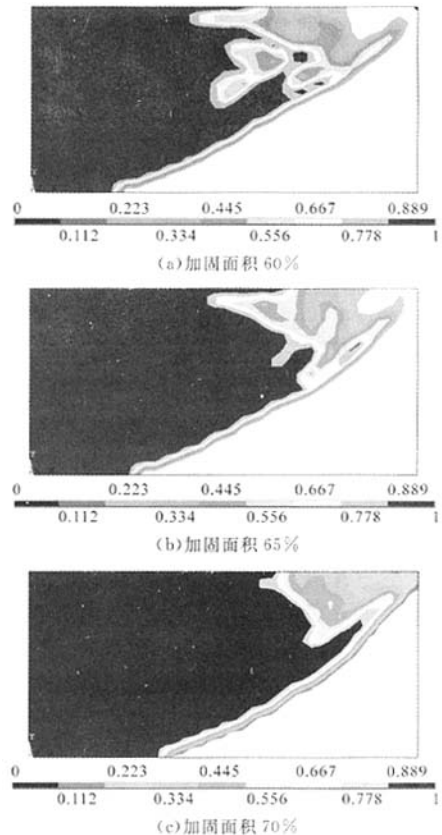


图 4 6 m-10 m-10 m 最优拓扑图(单元密度)

图 4(a)中,底面长度为 2.3 m;图 4(b)中,底面长度为 2.7 m;图 4(c)中,将底面加固长度增加到 3.5 m,此时,加固体路基接触边斜率最大,其割线斜率为 1:1.1。

4 结 语

(1) 拓扑优化基于变形能最小、刚度最大的优化目标函数与路桥过渡段路基加固的目标一致。因此,应用拓扑优化方法可得到路基加固体的初步布置方式。

(2) 路桥过渡段路基加固体的拓扑优化结果表明,采用上长下短的倒梯形布置形式的结构刚度最大,其抵抗地基沉降变形的能力最强,这表明桥头常用的倒梯形布置形式具有理论上的合理性。

(3) 路桥过渡段路基加固的不同区域对结构刚度的贡献排序为:固定端附近区域—中间偏上区域—中间偏下区域—路基顶面远端区域。

(4) 拓扑优化结果表明,路基加固体布置区域主要取决于面力荷载布置长度和加固面积大小。但路基加固体底面布置长度应不小于 2 m,由下向上斜率应缓于 1:1。

参考文献:

References:

- [1] 杜海珍,荣见华,傅建林,等.基于应变能的结构拓扑优化设计[J].交通运输工程学报,2004,4(3):34-37.
DU Hai-zhen, RONG Jian-hua, FU Jian-lin, et al. Structural topology optimization design based on strainenergy[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004,4(3):34-37.
 - [2] 刘代全,刘晓明,龙正聪.桥头跳车力学分析及台背刚柔过渡设计参数[J].公路,2002,(6):81-84.
LIU Dai-quan, LIU Xiao-ming, LONG Zheng-cong. Mechanical analysis of bump at bridge-head and discussion of rigid-flexibility transition design parameters of abutment back[J]. Highway, 2002, (6):81-84.
 - [3] 俞永华,谢永利,杨晓华.桥头楔形柔性搭板作用性状的仿真[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(6):29-32.
YU Yong-hua, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Simulation of active mechanics of wedge flexible approach slab at bridge abutment[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6):29-32.
 - [4] 杨晓华,戴铁丁,许心桩.土工格室在铁路软弱基床加固中的应用[J].交通运输工程学报,2005,5(2):12-17.
YANG Xiao-hua, DAI Tie-ding, XU Xin-zhuang. Geocell application in reinforcing soft subgrade of railway[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(2):12-17.
 - [5] 丁洲祥,龚晓南,李又云,等.考虑变质量的路基沉降变形协调分析法[J].中国公路学报,2005,18(2):6-11.
DING Zhou-xiang, GONG Xiao-nan, LI You-yun, et al. Method of stress-deformation compatibility analysis considering variable mass for roadbed settlement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(2):6-11.
 - [6] 刘保健,谢永利,李又云.公路软基在变荷载条件下的沉降计算[J].中国公路学报,2000,13(4):21-25.
LIU Bao-jian, XIE Yong-li, LI You-yun. Settlement calculation of highway soft foundation under the changeable load[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000,13(4):21-25.
 - [7] 许素强,夏人伟.结构优化方法研究综述[J].航空学报,1995,16(4):385-396.
XU Su-qiang, XIA Ren-wei. Methods of structural optimization: an overview[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1995,16(4):385-396.
- *****
- (上接第14页)
- WU Jian-min, WU Shi-sheng. Evaluating of overlay on cement concrete slab with joints by 3D FEM[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(1):10-13.
 - [5] 陈飞,张宁.刚性路面传力杆接缝传荷能力评价新方法[J].交通运输工程学报,2006,6(4):47-51.
CHEN Fei, ZHANG Ning. New load-transferred evaluating method at doweled joint of rigid pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006,6(4):47-51.
 - [6] 黄志义,王金昌.含裂缝沥青混凝土路面的粘弹性断裂分析[J].中国公路学报,2006,19(2):19-23.
HUANG Zhi-yi, WANG Jin-chang. Viscoelastic fracture analysis of asphalt concrete pavement with cracks[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006,19(2):19-23.
 - [7] 黄仰贤.路面分析与设计[M].北京:人民交通出版社,1994.
 - [8] 姚祖康.路面[M].北京:人民交通出版社,1998.
 - [9] Manuel J C M, Jorge C P. Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method[J]. Transportation Research Record, 2005, 1919:96-110.
 - [10] 陈拴发,郑木莲.破裂水泥混凝土路面沥青加铺层温度应力影响因素[J].交通运输工程学报,2005,5(3):25-29.
CHEN Shuan-fa, ZHENG Mu-lian. Thermal stress influence factors of asphalt overlay on cement concrete pavement cracking slab[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005,5(3):25-29.