

铁路道床截面形状优化分析^{*}

陈水生 雷晓燕 杜正国

(土木工程系)

(西南交通大学)

摘 要 道床是轨道结构的重要组成部分,道床截面的几何形状通常是由设计规范确定的。1997年12月1日起实施的设计规范中对道床截面几何形状规定的取值是根据经验或半经验制定的,缺乏理论依据。1998年本文应用优化理论,借助有限元分析方法,并考虑道碴材料的非线性性质,建立了铁路道床形状优化分析模型。1999年运用该模型,文章分析了不同机车、不同道碴材料、不同路基条件下的道床厚度及边坡比。1999年

关键词 铁路道床;形状优化;有限元法

分类号 U 213.71

0 引 言

道床是轨道结构的重要组成部分,道床截面的几何形状直接关系到轨道结构造价的经济性和工作时的稳定性。^[1]通常,道床截面的几何形状是由设计规范确定的。^[2]设计规范中对道床截面几何形状规定的取值是根据经验或半经验制定的,缺乏理论依据。^[3]然而,国内外对道床截面几何形状这样一个无论在实践上还是理论上都是十分重要的问题却研究甚少。^[4]本文的目的旨在从理论上探讨在各种载荷、各种工况条件下道床截面合理的几何形状,为设计规范提供理论依据。^[5]文章应用优化理论,借助有限元分析方法,并考虑道碴材料的非线性性质,建立了铁路道床截面形状优化分析模型。^[6]运用该模型,我们分析了不同机车、不同道碴材料、不同路基条件下的道床厚度及边坡比。^[7]计算表明,本文的分析方法切实可行,同时计算结果也验证了在大多数情况下,规范给出的参数是合理的。^[8]

1 道床截面形状优化分析模型

1.1 模型的建立

由于道床横截面具有中心对称的特点,本文只取道床的一半进行分析。^[9]优化模型由三种材料组成,它们分别为道碴、底渣和路基。^[10]路基的计算深度取为5 m,路基的下底边长取为6 m,假定道床顶面由轨枕底部传来的压力均匀分布在长度为 e 的范围,如图1所示。^[11]

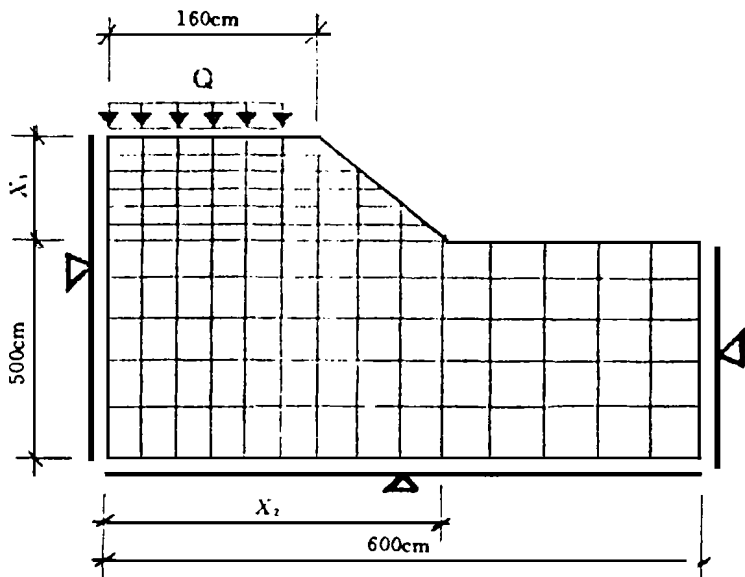


图1 道床截面形状优化分析模型

1.2 目标函数

由于道床的顶宽等于轨枕长度加肩宽,此值变化不大,根据设计规范取道床顶边边长的一半为160 cm^[13]本文的设计变量为道床的厚度和边坡比^[13]为了计算方便,将设计变量转换成道床的厚度及梯形截面的下底边长,分别记为 X_1, X_2 ^[13]目标函数为道床的截面积:

$$s = X_1(160 + X_2)/2.0$$

(1)

1.3 约束条件

- (1) $X_1 > 0$;
- (2) $160 < X_2 < 600$;
- (3) $\text{tg } \theta - (X_2 - 160)/X_1 > 0$;
- (4) $\sigma - [\sigma] < 0$;
- (5) $\sigma - [\sigma] < 0$ ^[13]

其中(1)、(2)为几何约束;(3)表示道床边坡比应大于道碴内摩擦角的正切;(4)、(5)分别表示路基顶面应力和道碴内部应力小于路基顶面许用应力 $[\sigma]$ 和道碴许用应力 $[\sigma]$ ^[13]当 $[\sigma] = 0$ 时,意味着道碴不能承受拉应力^[13]

道床截面形状优化分析的目的是寻找满足约束条件的设计变量,使目标函数最小^[13]

1.4 道碴的非线性性质

道床截面形状优化分析模型涉及三种材料^[13]为了简化计算,假设底渣和路基为线弹性材料^[13]道碴是一种散体材料,在外荷载的作用下呈现非线性性质,为了反映道碴的这种性质,通常假设道碴的

表1 道床材料常数

材料	E_r /kg cm ²	K_1	K_2
道碴	2 111.10	7 735.0	0.509
底碴	1 407.40	2 182.0	0.687
路基	703.40	527.0	1.083

变形模量为主应力的函数,其经验公式如下^[1]:

$$E_r = K_1 \theta^2 \quad (2)$$

其中, E_r 为材料的变形模量; θ 为三个主应力之和; K_1, K_2 分别为由实验确定的常数,其值取自表1^[3]泊松比因其变化不大,对计算结果影响甚微,可取为常数^[3]

由于道碴的变形模量取决于应力,而应力又与材料的变形模量有关,因此需要采用迭代方法确定^[3]详细论述可参阅文献^[7~8]^[3]

2 优化理论概述^{[2], [6]}

实际工程中的优化问题常常是有约束的^[3]对于具有约束的最优化问题,目前解法较多^[3]本文采用在工程中广泛使用的内点罚函数法,把有约束优化问题化为无约束优化问题,然后运用 HOOKE-JEEVES 直接搜索法寻求最优解^[3]所谓内点罚函数法就是将约束条件引入到目标函数中去,获得一新的目标函数,再在新的目标函数中设置一个或几个可以调整的参数^[3]通过不断调整这些参数,使不带约束的新的目标函数的最优解逐步逼近原问题的最优解^[3]运用此方法要注意正确选取设计变量的初始点和罚因子^[3]根据内点法的要求,参照现行设计规范,本文选取普通道床的厚度及边坡比为设计变量的初始值^[3]初始罚因子,经反复试算,当选取 $R=1$ 时有较好的收敛性^[3]

HOOKE-JEEVES 直接搜索法的思路是采用坐标轮换的方法来搜索有利方向,一旦方向有利则用模式移动进行寻优,找出最优点^[3]

2.1 应力约束的实现

一般的应力约束条件都包括最大应力不超过允许应力^[3]本文约束条件(4)、(5)中的 q 和 σ 都是设计变量 X_1, X_2 的非线性函数,且是设计变量的隐式函数,为优化分析增加了困难^[3]为此,利用多元函数台劳级数,将 q 和 σ 展开成设计变量 X_1, X_2 的线性函数,即

$$q(X) = q(X^0) + \frac{\partial q(X^0)}{\partial X_1}(X_1 - X_1^0) + \frac{\partial q(X^0)}{\partial X_2}(X_2 - X_2^0) \quad (3)$$

记

$$\nabla \sigma = \left\{ \frac{\partial \sigma}{\partial X_1} \quad \frac{\partial \sigma}{\partial X_2} \right\}^T$$

$\nabla \sigma$ 称为应力灵敏度,它是应力 $q(X)$ 随设计变量而改变的梯度^[3]求应力梯度有多种方法,依据本文研究具有设计变量少的特点,我们采用基于差分格式的算法计算应力灵敏度,即

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial X_1} &= \frac{q(X_1 + \Delta X_1, X_2) - q(X_1, X_2)}{\Delta X_1} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial X_2} &= \frac{q(X_1, X_2 + \Delta X_2) - q(X_1, X_2)}{\Delta X_2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由式(3)知,只要求出应力灵敏度, q 和 σ 便可用设计变量 X_1, X_2 显式地表示成线性函数^[3]计算应力灵敏度的步骤可归纳为:

a. 选择设计变量初始值为 $X_1^0 = 80$ cm, $X_2^0 = 300$ cm 能满足所有几何及应力约束条件,同时满足内点罚函数法域内取初始点的条件,可以作为初始值;

b. 估计 X_2 变化的幅度比 X_1 变化大,初始计算时取 $\Delta X_1 = 0.1$ cm, $\Delta X_2 = 0.2$ cm;

c. 由于步骤 b 对 ΔX 的取值缺乏理论根据, 因此按 b 步算出的最优解是不可靠的, 为了求得正确的最优解, 设 b 步结果为优解近似值, 记为 X_1^1, X_2^1 ;

d. 取 $\Delta X_1 = X_1^1 - X_1^0, \Delta X_2 = X_2^1 - X_2^0$ 为新的设计变量增量, 进行优化计算, 得当前最优解 X_1^1, X_2^1 ;

e. 以 X_1^1, X_2^1 为始点, 取 $\Delta X_1 = X_1^1 - X_1^0, \Delta X_2 = X_2^1 - X_2^0$, 进行优化计算, 求出优解近似值 X_1^1, X_2^1 , 转步骤 d, 得下步最优解 X_1^2, X_2^2 ;

f. 重复 d, e 两步骤, 直到前后两次最优解的差值小于给定精度为止^[13]

采用差分格式求应力灵敏度, 对具有 n 个设计变量的优化问题, 需要进行 $n+1$ 次结构分析^[13]。当设计变量少时, 这种方法具有明显的优点^[13]。由于本文研究的问题只有两个设计变量, 所以采用了该方法^[13]。

3 优化程序的实现

根据前面叙述的原理, 我们开发了道床截面形状优化计算程序 TBOP^[13]。本程序具有较强的前后处理功能, 输入数据十分方便, 只需输入简单的控制参数^[13]。程序具有自动划分网格、自动形成单元、自动生成约束及荷载信息等功能^[13]。本程序由 4 大块组成:

- (1) 前处理部分: 自动划分网格、自动形成单元、自动生成约束及荷载信息;
- (2) 有限元分析部分: 采用等参元进行非线性有限元分析;
- (3) 优化计算部分;
- (4) 后处理部分: 绘制道床内部的应力图, 位移图^[13]

TBOP 采用了两种计算机高级语言 C 和 FORTRAN 编制, 其中涉及图形处理用 TRRBC 编制, 而数值计算部分用 FORTRAN 编制^[13]。两种高级语言能各自独立地运行, 它们之间以数据文件方式通讯, 较好地解决了接口问题^[13]。

4 道床截面形状优化分析

将图 1 所示的道床截面形状优化分析模型划分成 174 个单元, 最上层 6 个单元^[13]考虑肩宽, 把外荷载均匀施加在前面 5 个单元上^[13]。道床部分分为 6 层, 上面 4 层为道碴, 下面 2 层为底碴^[13]。计算参数为: 弦 69 型钢筋混凝土轨枕; 60 kg/m 钢轨; 钢轨基础弹性系数 $K = 8 \text{ kN/cm}$; 轨枕间距采用 54.5 cm¹⁹。

计算中, 考虑道碴材料不同内摩擦角和不同路基顶面容许应力情况下道床截面形状优化各种工况^[13]。取前进蒸汽、东风 4 内燃和韶山 1 电力三种典型机车作为计算荷载^[13]。用参考文献^[4]的方法首先算出机车对轨枕的静态压力, 然后按准静态公式:

$$R_d = R(1 + \alpha + \beta) \quad (5)$$

计算出钢轨的动压力 R_d (其中 R 为静态压力, α 为速度影响系数, β 为偏载系数)^[13]。最后得到作用于道床顶面的荷载 Q

$$Q = R_d(b/e) \quad (6)$$

其中, e 为轨枕的有效支承长度, 取 $e = 133 \text{ cm}$; b 为轨枕的有效支承宽度, 取 $b = 26.7 \text{ cm}$ ^[13]。

道床和路基的材料参数为:

道碴:初始变形模量 2.11×10^2 MPa,泊松比0.27,容重 2.2×10^4 N/m³;

底碴:初始变形模量 1.41×10^2 MPa,泊松比0.28,容重 2.1×10^4 N/m³;

路基:变形模量 70 MPa,泊松比0.3,容重 2.0×10^4 N/m³ 19.

采用上述控制参数,使用TBOP分析了若干算例,分别得出了道床截面最优最度及边坡比,见表2~表4(13)

从计算结果,可以得到以下几点结论:

1. 对同一种机车,在相同的路基条件下,优化得出的道床厚度近似相等,而与道床的内摩擦角几乎没有关系,如表2所示(13)

2. 对同一种机车,道床的厚度随路基顶面容许应力的增大而减少,这与实际情况是相符的,与现行规范道床厚度为30~60 cm也是吻合的,如表3(13)

3. 不同的机车在相同的路基条件下,优化得出的道床厚度及

边坡比变化不大,如表4所示(13)因此在铁道工程设计中,只要依据某一具体的路基条件,选择一种典型的机车,就可以设计出适应各种机车的道床(13)

4. 优化得出的过坡比十分接近道碴的内摩擦角,也即在程序优化过程中,道床的斜边在满足内摩擦角约束条件的前提下尽量往里靠(13)例如内摩擦角为30°时的优化结果,得到的边坡倾角非常接近30°(13)如仅从经济的角度考虑,优化结果是合理的(13)但由于碎石道碴的内摩擦角是在静力荷载作用下保持稳定的最小倾斜角度(13)而道床通常是在反复作用的动荷载状态下工作,如将道床的过坡比选择为仅限于维持静力荷载作用,显然,稳定是得不到保证的(13)因此我们建议,合理的道床边坡比仍按规范1.5~1.75取值(13)

通过分析还发现:影响路基顶面应力的主要因素是道床的厚度,而边坡比的影响甚微(13)

表2 不同内摩擦角和不同机车类型条件下道床优化厚度(cm)

机车类型	内摩擦角 φ °		
	30	50	60
蒸汽机车	48.77	48.25	48.12
内燃机车	50.57	50.02	50.14
电力机车	64.19	63.17	63.87

说明:路基顶面容许应力为 1.32×10^5 Pa

表3 不同路基顶面容许应力条件下道床优化厚度

$[\sigma]/10^5$ Pa	1.30	1.32	1.34	1.36	1.38	1.40
厚度/cm	58.46	50.02	41.39	31.76	20.49	9.87

说明:机车类型为内燃机车;内摩擦角为50°

表4 不同机车类型在相同路基条件下道床优化厚度

机车类型	蒸汽机车	内燃机车	电力机车
厚度/cm	39.49	41.48	48.20

说明:路基顶面容许应力为 1.34×10^5 Pa

参 考 文 献

1 雷晓燕19道床应力有限元分析[学位论文]19上海:上海铁道学院 19.984

2 孙德敏19工程最优化方法及应用 19合肥:中国科技大学出版社,1991

3 Computational Mechanics 1986 theory and applications Volume II · supring-berlay toko berlin Heideberg, New York

4 童大堤19铁路轨道 19北京:中国铁道出版社,1990

5 T K S Murthy, F E Young, S letmann, W R Smith· Computers in Railway Installations, Track and Sig-

naling¹⁹Springer-verlay Berlinheideberg, 1987

6 王勖成, 邵敏¹⁹有限单元法原理与数值方法¹⁹北京:清华大学出版社, 1988

7 雷晓燕¹⁹用耦合法分析道床的弹塑性应力¹⁹铁道学报, 1990, 12(1)

8 雷晓燕¹⁹道床极限承载力的有限元分析¹⁹铁道学报, 1992, 14(1)

Analyses of Section Configuration Optimization for the Railway Ballast

Chen shuisheng¹ Lei Xiaoyan¹ Du zhengguo²

(¹ Civil Engineering Department ² Southwest China Jiaoton University)

Abstract Ballast is an improtant component of the railroad trackbed. The section geometric configuration is usually chosen in light of the data of reference design manual, which are based on experiences in maintance of railway ballast or short of the support of the theory. By using the optimization techniques and finite element methods and taking the ballast non-linear behaviour into account, the optimization model of section geometric configuration for the railway ballast is developed. By employing this model, the optimal ballast thickness and sideslope are obtained under the conditions of different locomatives, different ballast materials and different subgrades. The results demonstrate that the algorithm presented in the paper is effective and acceptable.

Key words railway ballast; configuration optimization; finite element method