

洋碰隧道断面形状设计优化问题研究

徐林生

(重庆交通学院桥梁隧道与结构工程研究所, 重庆 400074)

孙 钧

蒋树屏

(同济大学岩土所, 上海 200092) (交通部重庆公路研究所, 重庆 400067)

【摘要】 借助于数值分析的方法, 采用以洞周位移作为判断依据的优化思想, 从理论上探讨了京珠高速公路粤境北段洋碰隧道断面形状的设计优化问题。

【关键词】 洋碰公路隧道; 断面形状; 优化设计

【中图分类号】 TU457

Study on the Optimizing Design of Section Shape in Yangpeng Highway Tunnel

【Abstract】 With the help of method of numerical analysis and the periphery displacement of tunnel as the basic judged evidence, the problem of optimization design of the section shape in Yangpeng highway tunnel is theoretically discussed.

【Key words】 Yangpeng highway tunnel; section shape of tunnel; optimizing design

0 引言

在公路隧道等地下工程建设中, 人们不断地追求在各种荷载作用下围岩的性态响应(应力、位移和稳定性等), 使其达到预定的要求。隧道洞室的轴线一旦选定以后, 事实上围岩的介质和初始地应力场等边界条件也就客观存在不能改变了, 故设计中只能不断地调整洞室断面的几何形态、尺寸等, 以改善围岩的应力分布及其稳定性状态。隧道断面形状设计的方案不是唯一的, 而是有许多方案可供选择, 这就提出了优化问题^[1]。笔者尝试借助于数值分析的方法, 从理论上来探讨京珠高速公路粤境北段洋碰隧道断面形状的设计优化问题。

1 优化计算方法

以往, 用弹性理论对洞形优化的探讨大多是以应力集中的程度来判断洞形的优劣^[2]。

但在实际工程的应用中, 这将会遇到一系列的问题。首先在洞室周围的地层中, 可能有各种节理裂隙等构造, 施工也会造成一些引起地层松动的缝隙, 实际的应力分布很不均匀, 因而实际状态与理论解的应力值出入较大; 其次, 若仅仅知道洞周地层中某点的应力状态, 仍不足以判断整个地下洞室的稳定性; 再次, 因有限元方法本身的计算特点, 算得的高斯点应力精度甚高, 而分析实际要用的洞周节点的应力精度较差, 且高斯点的位置又要随网格形状的变化而变化。为此, 本文采用冯紫良教授(1993)提出的以洞周位移作为基本判断依据的优化方法, 从理论上来对洋碰隧道有关洞室的断面形状进行优化分析。以洞周位移作为基本判断依据的思想同交通系统有关规范的规定精神也是相符合的。

1.1 设计变量

在洞形设计优化过程中,设计者必须不断地改变洞形的几何形状,而在数值计算中洞形的几何形状是由洞周节点的坐标来确定的。直接以洞周节点的坐标作为设计变量,可能会造成设计变量过多而不易取得优化计算的成功。因而建议根据工程的具体特点,采用某些洞周几何控制点的坐标或者某些几何特征尺寸(如洞形的平均半径、洞室的跨度等)作为设计变量 \mathbf{X}

$$\mathbf{X} = (x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n)^T \quad (1)$$

上式中 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为所选定的设计变量的各个独立分量; n 为分量的总个数。为提高计算效率,对变量一般应作正规化处理,例如可设

$$x_i = \frac{l_i}{l_i^0} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: l_i^0 为在初始设计方案中第 i 个变量的取值; l_i 为当前设计方案相应变量的设计取值。

1.2 目标函数

为进行隧道洞室形状的最优分析,笔者根据有关文献中提出的控制洞周位移收敛量的思想,提出以洞周控制点(如洞顶、洞底、洞腰等)间的相对位移偏差值为目标函数,即设

$$f = \sum_{j=1}^m \frac{|D_j - \bar{D}|}{\bar{D}} \quad (3)$$

式(3)中 $D_j (j=1, 2, \dots, m)$ 为洞周岩层各控制点的位移值; m 为洞周地层位移控制点的数目,而 \bar{D} 为洞周地层各控制点的位移平均值,即:

$$\bar{D} = \frac{|D_1| + |D_2| + \cdots + |D_m|}{m} \quad (4)$$

显然,以求 f 式(3)为目标函数的优化将使岩层尽可能地产生均匀的洞周位移,而使各控制点间的位移偏差为最小。

1.3 约束条件

众所周知,对地下洞室的形状设计优化的工程实践来说,总是具有一定的设计约束条件的。如:

① 为满足工程的使用要求,对洞室的几何形状必有一些严格的使用要求,如对于洞室的高度、跨度往往有一定的使用要求,公路等

交通隧道对洞室的横截面积也有一定的使用要求。于是有

$$g_k(\mathbf{X}) \geq 0 \quad (k = 1, 2, \dots, p) \quad (5)$$

② 如以截面的特征尺寸为设计变量,则应保证各设计尺寸均为正值。即有

$$g_k = x_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = p_1 + 1, p_1 + 2, \dots, p) \quad (6)$$

此外,设计中的力学分析必须符合相应的力学原理(如使用位移法有限元计算时的最小势能原理等)。

综上所述,地下工程洞室形状设计优化问题可以写成如下的一般形式:

$$\left. \begin{array}{l} \min_{\mathbf{x} \in D_0} f(\mathbf{X}) \\ D_0 = \{ \mathbf{X} \mid g_k(\mathbf{X}) \geq 0, k = 1, 2, \dots, p \} \subset \mathbf{R}^n \end{array} \right\} \quad (7)$$

其中目标函数 $f(\mathbf{X})$ 和约束函数 $g_k(\mathbf{X})$ 为给定在 \mathbf{R}^n 上的实值函数。

1.4 优化算法

公路隧道等地下工程洞形设计优化计算在数学上是属于一类有约束的非线性规划问题。对于同时具有等式和不等式约束的优化问题,使用改进型的内罚函数法可获得良好的效果。洞形优化问题往往只含有等式约束,此时可应用广义简约梯度法,把有约束优化问题转化为无约束优化问题,使问题的独立设计变量数目得以减少而提高优化分析的计算效率。

广义简约梯度法的基本思想是根据等式约束方程 $g_k(\mathbf{X}) \geq 0$ 的个数 p , 把原 n 个设计变量分成两组

$$\mathbf{X} = (\mathbf{X}_B \mid \mathbf{X}_N)^T = (\mathbf{X}_B(\mathbf{X}_N), \mathbf{X}_N)^T \quad (8)$$

其中 \mathbf{X}_B 为 p 个非基本变量; \mathbf{X}_N 为 $n-p$ 个基本变量。此时 p 个等式约束可写成

$$h_j(\mathbf{X}) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (9)$$

而原目标函数可改写为

$$f(\mathbf{X}) = f(\mathbf{X}_B, \mathbf{X}_N) = F(\mathbf{X}_N) \quad (10)$$

应用梯度法进行迭代时,先计算基本变量 \mathbf{X}_N^{k+1} , 然后由式 $h_j(\mathbf{X}) = 0$ 求得非基本变量。

$$X_N^{k+1} = X_N^k - \lambda^k \nabla F(X_N^k) \quad (11)$$

$$\nabla F(X_N^k) = \nabla_{x_N} f(X^k) - \nabla_{x_B} h(X^k) (\nabla_{x_B} h(X^k))^{-1} \nabla_{x_B} f(X^k) \quad (12)$$

上式中, λ^k 为步长因子, 应根据迭代的成功或失败对 λ^k 作适当的调整; $\nabla F(X_N^k)$ 为广义简约梯度。

应用广义简约梯度法进行优化分析的计算流程见图 1。

在进行形状设计优化分析的迭代过程中, 必须改变洞室形状的几何尺寸。因而在计算时, 首先需要根据当前的设计变量 X^k 调整网格设计参数, 并据此生成新的网格系统, 然后计算荷载向量及地应力等效荷载向量。待有限元弹塑性分析收敛后, 即可按求 f 式(3)算得目标函数值。目标函数的计算流程见图 2。

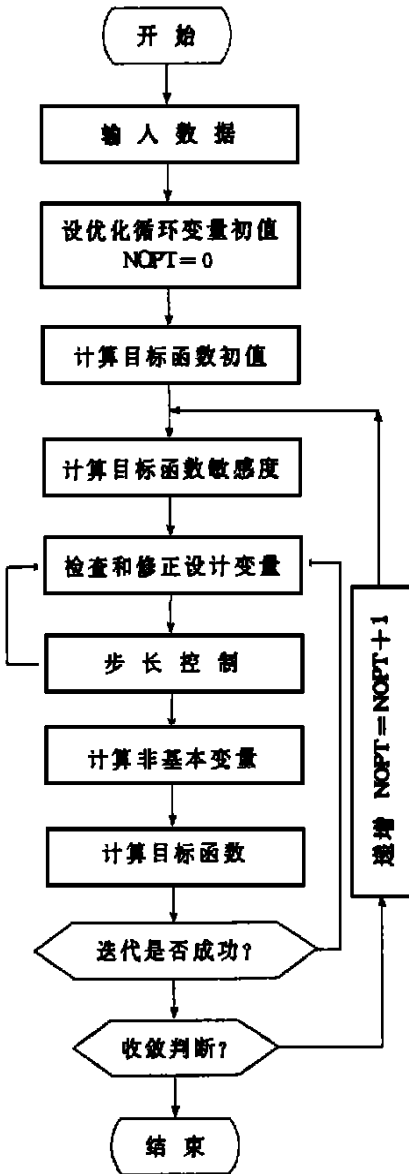


图 1 优化计算流程图

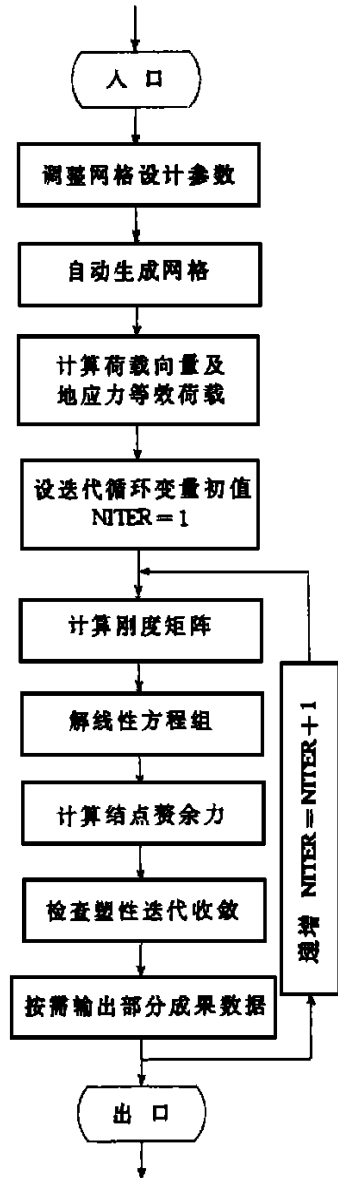


图 2 目标函数计算流程图

洞形优化问题最主要的计算工作量是用于对设计变量的敏感度的计算。对于一般的隧道地下工程洞形优化问题,常可以简化为平面问题来求解,从而节省计算时间。

2 优化计算过程与结果分析

交通部第二公路勘察设计院提供的洋碰公路隧道三心圆拱一般净空设计断面形状、规

格见图3。从图3中可知^③,其一般设计断面净高 $H_0=7.25$ m,实际净跨 L_0 约为11 m;圆心 O_1 、 O_2 距底线的高度 M_0 均为1.8 m, O_2 、 O_2' 距隧洞中心轴线的水平距离 N_0 也均为1.26 m;圆心 O_1 距底线的高度 $P_0=1.45$ m;净空断面积 S 约为68.39 m²。

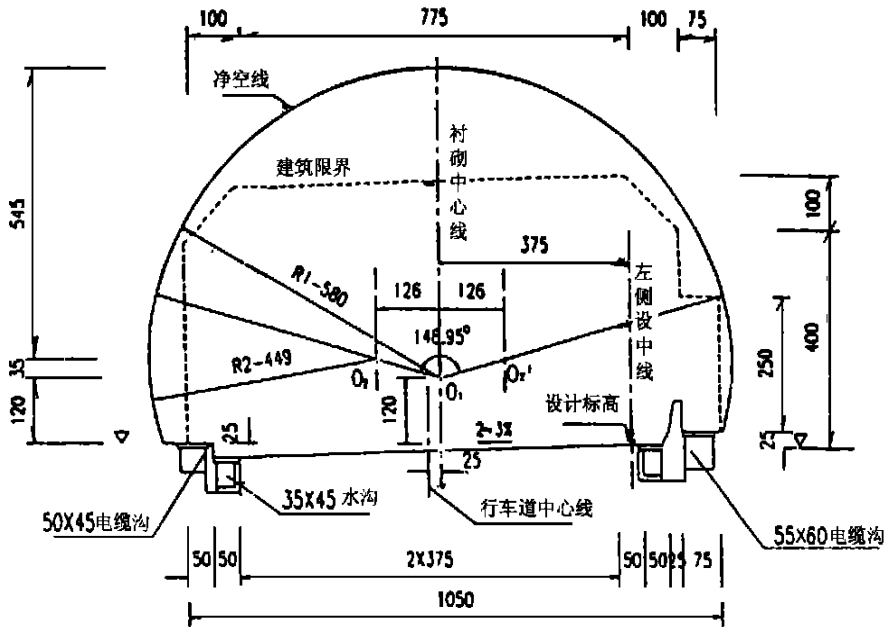


图3 洋碰隧道三心圆拱一般净空设计断面(单位:cm)

其中进行的二维有限元计算中,是以洋碰隧道V类围岩作为研究对象。其介质的本构关系设为服从Mohr-Coulum屈服准则的弹性模型。主要介质参数弹性模量 $E=35\ 000$ MPa,泊松比 $\mu=0.22$,重度 $\gamma=0.026$ MN/m³,内聚力 $c=1.0$ MPa,内摩擦角 $\varphi=40^\circ$ 。计算模型周界均取至距隧洞中心3倍跨度,其左右边界约束水平方向的位移;底部边界约束垂直方向的位移;顶部边界上则施加3.38 MPa的荷载以模拟平均上覆自重应力;水平侧压力系数 $\eta=\frac{\mu}{1-\mu}$,故 η 取值0.2821。

计算模型单元数为382个、节点数898个。

这里优化计算目标是要求在保证其洞室净空断面积 S 和建筑限界范围均不变的条件下,来优化设计最为安全、稳定的洞形。按式(1)、(2)的要求,现选取设计变量:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T = \begin{pmatrix} H & M & N & P & R_1 & R_2 \\ L_0 & L_0 & L_0 & L_0 & L_0 & L_0 \end{pmatrix}^T \quad (13)$$

上式中,变量 H 、 M 、 N 、 P 分别为断面的净高、圆心 O_1 和 O_2 距底线的高度、圆心 O_2 和 O_2' 距隧洞中心轴线的水平距离、圆心 O_1 距

③交通部第二公路勘察设计院.京珠国道主干线粤境高速公路小塘到甘塘段G标段E册设计图.1996

底线的高度, R_1 、 R_2 分别为图 3 中三心圆拱的二个半径变量。

约束条件为设计变量的非负规定以及:

$$\int ds = 68.39 \quad (14)$$

显然, 利用前述式(3)、(4), 很容易写出以设计变量为自变量的相应表达式。选取的目标函数为:

$$f = \frac{\sum_{i=1}^4 |\Delta D_i|}{D_m} \quad (15)$$

其中, D_m 为洞周控制点用上述二维有限元法求得的位移之平均值, 可按下式计算:

$$D_m = \frac{|D_r| + |D_B| + 2|D_w|}{4} \quad (16)$$

上式中, D_r 、 D_B 、 D_w 分别为洞顶、洞底和两侧边墙中点处的位移值。 ΔD_i ($i=1, 2, 3, 4$) 则分别为洞顶、洞底和两侧边墙中点处的偏差位移:

$$\left. \begin{aligned} \Delta D_1 &= D_r - D_m \\ \Delta D_2 &= D_B - D_m \\ \Delta D_3 &= \Delta D_4 = D_w - D_m \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

本次优化计算经过 28 次迭代, 最后求得最优点的设计变量为:

$$X^* = (0.60, 0.00, 0.00, 0.00, 0.60, 0.60)^T$$

此时, 图 3 所示设计净空断面优化计算后相应的断面净高 H^* 、圆心 O_2 和 O'_2 距底线高度 M^* 、 O_2 和 O'_2 距隧洞中心轴线的水平距离 N^* 、圆心 O_1 距底线高度 P^* 以及半径 R_1^* 、 R_2^* 分别为:

$$(H^*, M^*, N^*, P^*, R_1^*, R_2^*)^T = (6.60, 0.00, 0.00, 0.00, 6.60, 6.60)^T$$

这里, 目标函数值 f 随着计算迭代次数 n 增加的收敛速度较快, 大约经过 10 次迭代后即趋于基本稳定 (见图 4)。

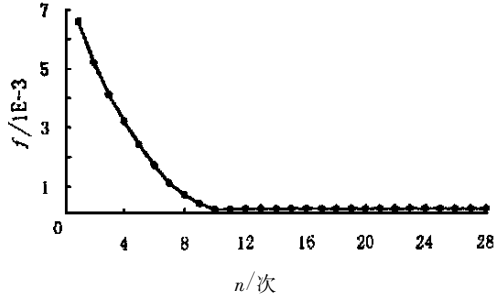


图 4 目标函数 f 与迭代次数 n 的关系图

3 结论

在保证洋碰隧道一般净空设计断面积和建筑限界范围均不改变的条件下, 上述数值分析表明其净空断面理论上尚可以进一步优化成单心半圆拱状, 优化后的单心圆拱净高及其半径均为 6.60 m、净跨 13.20 m。与优化前的三心圆拱一般净空设计断面相比, 优化后的单心半圆拱不仅可以改善其隧道断面的受力结构状态和简化其施工工序, 而且还使原设计净跨由 11 m 增大到优化后的 13.20 m, 故实际上提高了净空断面的落地利用率。

参 考 文 献

- 1 孙钧. 地下工程设计理论与实践. 上海: 上海科学技术出版社, 1996. 1~5
- 2 吕爱钟. 地下洞室最优开挖形状的确定方法. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(3): 410~413

收稿日期: 2001-04-13