

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.01.006

浅埋偏压隧道洞顶上覆岩体安全厚度的确定

陈清, 贺建清, 蒋鑫, 罗婉

(湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 借助结构稳定理论中在均布荷载与集中力作用下的梁模型, 建立了梯形荷载作用下的简支梁模型, 并计算其挠曲线方程。将浅埋偏压隧道近似看成受梯形荷载作用下的简支梁, 利用计算出的挠曲线方程计算出简支梁最大弯矩; 由应力计算公式和强度条件, 在弯曲应力不大于容许弯曲应力的条件下, 可得到洞顶上覆岩体最小安全厚度。在浅埋偏压隧道开挖前, 可通过最小安全厚度的计算判断设计上的覆岩体厚度是否符合安全要求, 以避免工程事故的发生。

关键词: 浅埋偏压; 梯形荷载; 安全厚度; 稳定理论

中图分类号: TU452

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)01-0024-04

Determination of Safety Thickness of Overlying Rock Mass on Shallow Bias Tunnel Crest

Chen Qing, He Jianqing, Jiang Xin, Luo Wan

(School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China)

Abstract: Based on the beam model under the action of uniform load and concentrated force in structure stability theory, a simply supported beam model under the action of trapezoidal load was established and its flexural equation was calculated. And shallow-buried bias tunnel was treated as simply supported beam under the action of trapezoidal load, the maximum bending moment of simply supported beam was computed by the calculated flexural equation. Under the condition of the bending stress not beyond the allowable bending stress, the minimum safety thickness of overlying rock mass on hole crest was obtained on the basis of stress calculation formula and strength conditions. Before the shallow-buried bias tunnel excavation, it can be judged through the minimum safety thickness calculation whether the designed overlying rock thickness meets the safety requirements or not, so as to avoid engineering accidents.

Keywords: shallow-buried bias tunnel; trapezoidal load; safety thickness; stability theory

0 引言

隧道工程中出现受偏压荷载(不对称荷载)的隧道称为偏压隧道。隧道出现偏压的原因主要有地形原因与地质原因:地形上,若洞顶覆盖岩体较薄,

地面横坡显著倾斜时,则易发生偏压,多见于洞口浅埋地段及傍山浅埋地段;地质上,若隧道围岩为倾斜层状结构,层间黏结力差、伴随有害节理裂隙切割时,或洞身有倾角较陡的软弱结构面,围岩一部分较软、一部分较硬时,或存在软弱夹层断裂带

收稿日期: 2012-12-10

基金项目: 湖南省教育厅基金资助项目(12K103), 湖南省科技计划基金资助项目(2009SK3037)

作者简介: 陈清(1987-),男,湖南岳阳人,湖南科技大学硕士生,主要研究方向为隧道工程,

E-mail: 394614427@qq.com

时,均易发生偏压^[1]。

近年来,随着高速公路、高铁、地铁等工程的高速发展,在多山区的南方以及高原区的西部隧道工程中出现浅埋偏压的情况日益增多,从而使得浅埋偏压隧道研究显得越来越重要。目前,国内外科研工作者对于浅埋偏压隧道的施工方法、变形机理、围岩稳定数值模拟等方面的研究较多,但对于浅埋偏压隧道上覆岩体稳定理论的研究较少。如江学良^[2]在岩石地下洞室与边坡相互影响研究中,改进了均布荷载与集中力作用下的梁模型,并利用改进的梁模型计算了均布荷载作用下的地下洞室顶板安全厚度;刘军等人^[3]在突变理论在安全埋高研究中的应用中,应用突变理论,建立了西南某巨型水电站地下厂房顶拱岩体安全埋高尖点突变模型,通过该模型,较好地解决了地下厂房顶拱岩体的变形破坏问题以及生产实践中提出的安全埋高问题。

本文借助结构稳定理论中在均布荷载与集中力作用下的梁模型,建立了梯形荷载作用下的简支梁模型,计算并建立梯形荷载作用下简支梁模型的挠曲线方程;将浅埋偏压隧道近似看成受梯形荷载作用下的简支梁,利用计算出的挠曲线方程计算出简支梁的最大弯矩,由应力计算公式和强度条件,在弯曲应力不大于容许弯曲应力的条件下,计算出洞顶上覆岩体的最小安全厚度。通过最小安全厚度的计算,可判断设计的上覆岩体厚度是否符合安全要求,以避免工程事故的发生。

1 受梯形荷载的梁模型的建立

结构稳定理论中,梯形荷载作用下的梁模型的建立采用简支梁法^[4-5],如图1所示。

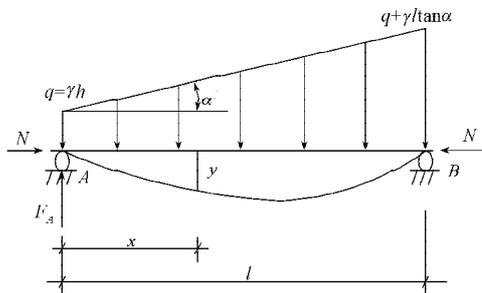


图1 梯形荷载作用下的梁模型

Fig. 1 Beam model under the action of trapezoidal load

图1所示梁上受梯形荷载 $q \rightarrow q + \gamma l \tan \alpha$ 和轴力 N 的作用,且满足如下假设:

- 1) 材料服从虎克定律, $\sigma = E\varepsilon$, 其中 σ 为应力, E 为弹性模量, ε 为应变;
- 2) 梁变形微小, $\frac{1}{\rho} = y''$, 其中 ρ 为曲率半径, y 为

梁的挠曲线方程;

3) 梁限制在竖直平面内弯曲。

取梁的 A 端为坐标原点, 则 A 端支座的反力为:

$$F_A = \frac{ql}{2} + \frac{\gamma l^2 \tan \alpha}{6} \quad (1)$$

距坐标原点为 x 的点的内外力矩平衡条件为

$$EIy'' + Ny = - \left(\frac{qx^2}{2} + \frac{\gamma x^3 \tan \alpha}{3} \right) - \left(\frac{ql}{2} + \frac{\gamma l^2 \tan \alpha}{6} \right) x + \left(\frac{q+q+\gamma x \tan \alpha}{2} x \right) x \quad (2)$$

将式(2)化简, 可得

$$y'' + \frac{N}{EI} y = \frac{\gamma \tan \alpha}{6EI} x^3 + \frac{q}{2EI} x^2 - \frac{1}{EI} \left(\frac{ql}{2} + \frac{\gamma l^2 \tan \alpha}{6} \right) x \quad (3)$$

令 $k^2 = \frac{N}{EI}$, 则式(3)可化为:

$$y'' + k^2 y = \frac{\gamma \tan \alpha}{6EI} x^3 + \frac{q}{2EI} x^2 - \frac{1}{EI} \left(\frac{ql}{2} + \frac{\gamma l^2 \tan \alpha}{6} \right) x \quad (4)$$

式(4)为一个二阶常系数非齐次线性微分方程, 此方程对应的齐次线性方程 $y'' + k^2 y = 0$ 的通解为

$$\bar{y} = A \sin kx + B \cos kx \quad (5)$$

下面求非齐次方程的一个特解 y^* 。

因为

$$f(x) = \frac{\gamma \tan \alpha}{6EI} x^3 + \frac{q}{2EI} x^2 - \frac{1}{EI} \left(\frac{ql}{2} + \frac{\gamma l^2 \tan \alpha}{6} \right) x$$

故 $\lambda = 0$, 而 0 不是特征方程的根, 从而可设

$$y^* = a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad (6)$$

将 y^* 代入原方程, 并比较同次幂的系数, 可得

$$y^* = \frac{\gamma \tan \alpha}{6N} x^3 + \frac{q}{2N} x^2 + \left(\frac{ql}{2N} + \frac{\gamma l^2 \tan \alpha}{6N} + \frac{\gamma \tan \alpha}{Nk^2} \right) x - \frac{q}{Nk^2} \quad (7)$$

所以非齐次线性微分方程(4)的通解为

$$y = \bar{y} + y^* = A \sin kx + B \cos kx + \frac{\gamma \tan \alpha}{6N} x^3 + \frac{q}{2N} x^2 + \left(\frac{ql}{2N} + \frac{\gamma l^2 \tan \alpha}{6N} + \frac{\gamma \tan \alpha}{Nk^2} \right) x - \frac{q}{Nk^2} \quad (8)$$

其中 A 和 B 为待定常数。

根据边界条件 $x=0, y=0$ 以及 $x=l, y=0$, 将它们代入式(8)可解得:

$$\begin{cases} A = \frac{3q - \gamma l^3 k^2 \tan \alpha - 3ql^2 k^2 - 3\gamma l \tan \alpha - 3q \cos kl}{3Nk^2 \sin kl} \\ B = \frac{q}{Nk^2} \end{cases}$$

将解得的 A 和 B 代入式 (8), 可得梁模型的挠曲线方程为:

$$y = \frac{3q - \gamma l^3 k^2 \tan \alpha - 3ql^2 k^2 - 3\gamma l \tan \alpha - 3q \cos kl}{3Nk^2 \sin kl} \sin kx + \frac{q}{Nk^2} \cos kx + \frac{\gamma \tan \alpha}{6N} x^3 + \frac{q}{2N} x^2 + \left(\frac{ql}{2N} + \frac{\gamma l^2 \tan \alpha}{6N} + \frac{\gamma \tan \alpha}{Nk^2} \right) x - \frac{q}{Nk^2}, \quad (9)$$

根据 $M = -EIy''$, 可得到梁任意截面处的弯矩。

2 浅埋偏压隧道洞顶上覆岩体安全厚度的计算

为了利用建立的梁模型计算浅埋偏压隧道洞顶上覆岩体的安全厚度, 建立如图 2 所示的浅埋偏压隧道模型^[6-8]。

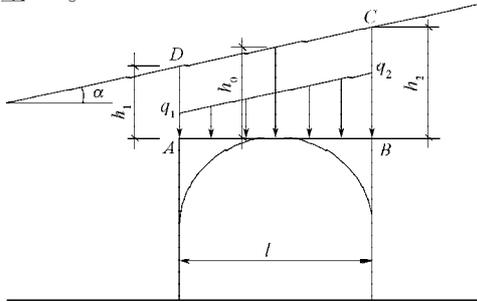


图2 浅埋偏压隧道模型

Fig. 2 Shallow-buried bias tunnel model

如图 2, 隧道开挖在坡角为 α 的山体内, 洞顶上覆岩体受到自重应力与水平侧压力, 以及相对两侧岩体滑动产生的摩擦力作用; 将隧道弧形顶筒化成 AB 直线顶, 则可将隧道洞顶上覆岩体看成一个 $q_1 \rightarrow q_2$ 承受偏压荷载作用, 且高度为 h_0 、跨度为 l 的简支梁, 即可用梯形荷载作用下的简支梁模型来计算洞顶上覆岩体的安全厚度。

浅埋偏压隧道在设计选址确定后, 可以通过现场勘察得到 α, h_1, h_0, h_2, L 等数据, 岩样室内试验可以得到岩体的容许弯曲应力 $[\sigma]$ 和岩体的容重 γ 等指标。

梁截面应力的计算公式为:

$$\sigma = M/W, \quad (10)$$

式中, W 为截面抵抗弯矩, 对于矩形截面抵抗弯矩, $W = bh^2/6$, 其中 b 为截面宽度, h 为截面高度。

上覆岩体在荷载作用下能够正常工作, 其上覆岩体的应力必须满足如下强度条件:

$$\sigma \leq [\sigma], \quad (11)$$

式中 $[\sigma]$ 为容许抗弯强度。

即 $M/W \leq [\sigma]$ 。 (12)

从式 (12) 可以看出, 上覆岩体在荷载作用下能

否正常工作, 由上覆岩体梁模型最大弯矩截面是否满足强度条件确定。

由 $M = -EIy''$ 以及式 (9) 可得

$$M = \frac{3q - \gamma l^3 k^2 \tan \alpha - 3ql^2 k^2 - 3\gamma l \tan \alpha - 3q \cos kl}{3k^2 \sin kl} \sin kx + \frac{q}{k^2} \cos kx - \frac{\gamma \tan \alpha}{k^2} x - \frac{q}{k^2}, \quad (13)$$

式中: $q = \gamma h_1$; α 为坡度; $h_1 = h_0 - l \tan \alpha$; l 为隧道宽度。

以 M 对 x 求导, 可得:

$$M'(x) = \frac{3q - \gamma l^3 k^2 \tan \alpha - 3ql^2 k^2 - 3\gamma l \tan \alpha - 3q \cos kl}{3k \sin kl} \cos kx - \frac{q}{k} \sin kx - \frac{\gamma \tan \alpha}{k^2}. \quad (14)$$

简支梁模型的弯矩两端为 0, 且弯矩连续, 则在 $0 \rightarrow l$ 只存在一个极值, 即 $M'(x) = 0$ 时, 求得 x 处弯矩最大, 则:

$$\frac{3q - \gamma l^3 k^2 \tan \alpha - 3ql^2 k^2 - 3\gamma l \tan \alpha - 3q \cos kl}{3k \sin kl} \cos kx - \frac{q}{k} \sin kx - \frac{\gamma \tan \alpha}{k^2} = 0. \quad (15)$$

上式在求解 x 过程中, 参数 q, l, k, α 都是未知的, 以致求解比较困难, 但在工程实际中, 当隧道选址后, 这些参数可以通过工程地质勘察得到, 将所得参数代入式 (16) 中, 就可求解出 x 。将求出的 x 代入式 (14) 中即可得到最大弯矩 M_{\max} , 把 M_{\max} 代入式 (13), 可得

$$\frac{M_{\max}}{W} \leq [\sigma]. \quad (16)$$

式 (16) 表明, 可以用岩体容许弯曲应力来求最小安全厚度与设计安全厚度之比, 以判断浅埋偏压隧道洞顶上覆岩体是否稳定; 也可以通过设计上覆岩体厚度来求最大弯曲应力是否超过容许弯曲应力, 以判断浅埋偏压隧道洞顶上覆岩体是否稳定。

3 算例

本文采用文献[7]中大坪子浅埋偏压隧道工程中的实际参数验算本文所提方法, 具体参数如下: 上覆岩体重度 $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$, 洞中间顶部上覆岩体厚度为 $h_0 = 7.381 \text{ m}$, 边坡坡角 $\alpha = 33.7^\circ$, $\tan \alpha = 1:1.5$, 隧道洞宽 $L = 10.5 \text{ m}$, 岩体弹性模量 $E = E_0 = 15 \text{ GPa}$, 水平地应力 $\sigma_h = 13.4 \text{ MPa}$ 。

将上覆岩体近似为作用梯形自重应力与水平地应力的简支梁, 取 1 m 宽岩体计算, 即简支梁 $b = 1 \text{ m}$, 将上述参数代入式 (15), 可得 $x = 7.36 \text{ m}$, 再将 x 代入

式(13)和(17)中,得到弯曲应力 $\sigma=6.41$ MPa,小于该岩体的容许弯曲应力,故可知大坪子浅埋偏压隧道工程洞顶上覆岩体厚度符合安全要求。

4 结论

1) 应用结构稳定理论中在均布荷载与集中力作用下的梁模型,可建立梯形荷载作用下的简支梁模型,以计算在梯形荷载作用下的简支梁模型的挠曲线方程;

2) 利用建立的梯形荷载作用下的简支梁模型,经计算,可得到浅埋偏压隧道洞顶上覆岩体的最小安全厚度;

3) 浅埋偏压隧道洞顶上覆岩体的最小安全厚度与坡度 α 、隧道洞宽 L 、岩体容重 γ 以及岩体容许弯曲 $[\sigma]$ 等参数有关,这些参数在隧道设计与选址勘察后都可以确定。通过最小安全厚度的计算,可判断设计的上覆岩体厚度设计是否符合安全要求,以避免工程事故的发生。

参考文献:

- [1] 柳雁玲, 佴磊, 刘永平. 和龙沿江公路傍山隧道偏压特征分析[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2006, 36(2): 240-244.
Liu Yanling, Nie Lei, Liu Yongping. Analysis on the Asymmetrically Loaded Characteristics of the Mountain Adjacent Tunnel[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(2): 240-244.
- [2] 江学良. 岩石地下洞室与边坡相互影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
Jiang Xueliang. Study on Interaction of Rock Underground Cavern and Slope[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [3] 刘军, 谢晔, 张倬元, 等. 突变理论在安全埋高研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 879-882.
Liu Jun, Xie Ye, Zhang Zhuoyuan, et al. Application of Catastrophic Theory into Research on Safe Height[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 879-882.
- [4] 唐绍敏. 稳定理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989: 182-193.
Tang Shaomin. Stability Theory[M]. Beijing: China Communications Press, 1989: 182-193.
- [5] 唐家祥, 王仕统, 裴若娟. 结构稳定理论[M]. 北京: 中国铁路出版社, 1989: 139-162.
Tang Jiaxiang, Wang Shitong, Pei Ruojuan. Theory of Structural Stability[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1989: 139-162.
- [6] 王兵, 谢锦昌. 偏压隧道模型试验及可靠度分析[J]. 工程力学, 1998, 15(1): 85-93.
Wang Bing, Xie Jinchang. Model Test and Reliability Analysis for an Unsymmetrically Loaded Tunnel[J]. Engineering Mechanics, 1998, 15(1): 85-93.
- [7] 路军富, 朱文喜, 李月. 岩土偏压荷载对隧道的影响及其防治[J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2006, 25(6): 89-92.
Lu Junfu, Zhu Wenxi, Li Yue. Study on the Influence of Uneven Pressure of Rock and Soil on a Tunnel and Its Preventive Measures[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2006, 25(6): 89-92.
- [8] 重庆交通科研设计院. JTG D70—2004公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004: 95-99.
Chongqing Communications Research and Design Institute. JTG D70—2004 Code for Road Tunnel Design[S]. Beijing: China Communications Press, 2004, 95-99.

(责任编辑: 廖友媛)