

地震时隧道衬砌受力敏感性的简化理论分析

安永林, 彭立敏, 黄娟

(中南大学土木建筑学院, 湖南长沙 410075)

摘要:为了分析地震区隧道对各影响因素的敏感性,把隧道简化为圆形用拟静力法考虑地震的作用;围岩压力简化为均布,运用结构力学中的力法原理,结合敏感度函数的定义,推导了衬砌的内力(弯矩、轴力、剪力)关于垂直和水平地震作用力、地震作用下增加的孔隙水压力和围岩压力的敏感度函数。并对一工程实例进行了计算。结果表明:衬砌内力对各影响因素的敏感性与各因素数值的大小无关,与衬砌结构形状及侧压力系数有关;并随着侧压力系数的增加敏感性减小,表明浅埋隧道对地震的作用更敏感;衬砌对水平地震作用敏感性最大,并指出了一些最敏感的部位;孔隙水压力的存在有助于改善隧道的受力。

关键词:隧道工程;地震;敏感性;衬砌内力;拟静力法

中图分类号: TU311.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2008)03-0261-05

Simple Theoretical Analysis on Sensitivity of Tunnel Lining Internal Forces Due to Earthquake Action

AN Yong-lin, PENG Li-min, HUANG Juan

(School of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: A pseudo-static analysis method is presented to calculate sensitivity of lining internal forces due to earthquake action considering influential factors such as vertical and horizontal seismic loads, pore pressure build up, and rock pressure. The method is applied to a engineering project also. Results show that: the sensitivity has no relation to the value of the influential factors, but to the shape of the tunnel and coefficient of lateral pressure; the sensitivity is in the direct proportion to the coefficient of lateral pressure, which implies that shallow buried tunnels are more sensitive to seismic load; horizontal seismic load is the most sensitive factor of lining forces and some most sensitive positions are given; water pore pressure is good to lining's internal forces.

Key words: Tunnel engineering; Earthquake; Sensitivity; Internal force of lining; Pseudo-static analysis method

0 引言

以往人们普遍认为地下结构具有较好的抗震性,而对地面结构相关的地震研究较多^[1,2]。但随着地震的频繁发生,有些强震对地下结构造成了强烈的破坏,如1995年的神户地震。因此对地下结构的抗震研究引起了国内、外学者和工程人员的重新关注: Hwang Jin-Hung 等对既有隧道的抗震能力进行

了评估^[3]; Pakbaz Mohammad C. 对地震作用下的圆形隧道进行了二维分析^[4]; Konagai K. 等对隧道的隔震措施进行了探讨^[5]; 高峰、严松宏等对隧道洞口段的抗震设防长度、随机地震响应下的动力可靠度、地震作用下沉管隧道接头力学性能等方面进行研究^[1,2,6]; 陈贵红等对地震区公路隧道洞门设计开展了新的尝试^[7]; 李云鹏等对地震下小间距隧道

收稿日期: 2008-01-25

基金项目: 铁道部科技研究开发计划课题(2006G007-B)

作者简介: 安永林(1981-),男,安徽寿县人,博士研究生。主要从事隧道与地下工程结构与防灾方面的研究。

围岩流变损伤进行了数值分析^[8];杨小礼等对浅埋大跨度连拱隧道的地震反应进行了研究^[9];刘晶波等对地铁盾构隧道地震反应进行了研究^[10];许增会等对地震下隧道围岩稳定性进行了数值模拟^[11]。

本文主要分析了地震作用下隧道衬砌内力(弯矩、轴力、剪力)对垂直地震作用、水平地震作用、地震时孔隙水压增量、围岩压力的敏感程度。

1 敏感度函数和敏感度因子

为了分析地震作用下隧道衬砌内力对各影响参数的敏感性,首先定义敏感度函数,继而得出敏感度因子,从而可以用一个统一的标准来衡量各参数的敏感程度^[12]。

假设有一衬砌内力系统特性表示如下:

$$Q = f(a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (1)$$

式中 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 为影响衬砌内力系统特性的参数。

在某一基准状态下 $a^* = \{a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*\}$, 衬砌内力系统特性为状态为 Q^* 。参数敏感性分析即:令各影响参数在各自可能的范围内变动,分析由于这些影响参数的变动,衬砌内力系统特性 Q 偏离基准状态的趋势和程度。

给定某一基准参数,若分析参数 a_k 对衬砌内力系统特性 Q 的影响时,可令其余各参数取基准值且固定不变,而令 a_k 在其可能的范围内变动,这时衬砌内力系统特性表现为

$$Q = f(a_1^*, a_2^*, \dots, a_{k-1}^*, a_k, a_{k+1}^*, \dots, a_n^*) \quad (2)$$

敏感度函数定以为

$$S_k(a_k) = \left| \frac{\Delta Q}{\Delta a_k} \right| \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

在 Δa_k 很小的情况下, $S_k(a_k)$ 可近似表示为

$$S_k(a_k) = \left| \frac{\partial Q}{\partial a_k} \right| = \left| \frac{dQ}{da_k} \right| \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

由式(3)或式(4)可绘出 a_k 的敏感度函数曲线 $S_k - a_k$ 。取 $a_k = a_k^*$, 即可得到参数 a_k 的敏感度因子 S_k^* 。

$$S_k^* = S_k(a_k^*) = \left| \frac{dQ}{da_k} \right|_{a_k=a_k^*} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

S_k^* 值越大,则在基准状态下,衬砌内力 Q 对参数 a_k 越敏感。通过对 S_k^* 的比较,就可以评价衬砌内力系统特性对各因素的敏感性程度。

2 地震时隧道衬砌内力计算

2.1 基本假定

为了方便计算衬砌内力,从理论上分析地震时隧道衬砌内力的参数敏感性,将其简化为圆形的平面应变模型,采用拟静力法考虑地震的作用。弯矩以衬砌的内边缘受拉为正,轴力以衬砌受压为正,剪力以顺时针方向为正。基本假定如下^[13]:

(1) 忽略衬砌的轴向变形和剪切变形的影响;忽略衬砌的自重;不考虑围岩的弹性抗力。

(2) 非地震时的孔隙水压力 and 地震时增加的孔隙水压力简化为均布荷载。

(3) 各影响参数相互独立;结构为线弹性,且满足叠加原理。

2.2 地震作用下的衬砌内力计算

2.2.1 垂直地震作用下的衬砌内力

当隧道衬砌受垂直地震作用时,其为左右、上下对称结构,取 $1/4$ 结构计算,如图1所示。

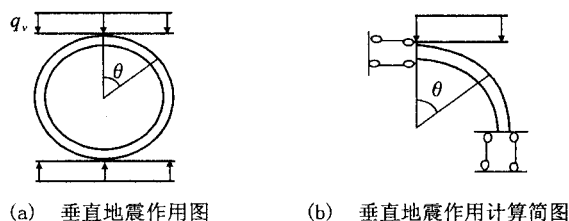


图1 垂直地震作用分析

Fig. 1 Analysis of vertical seismic load.

隧道垂直地震作用可由式(6)确定,在隧道的跨度范围内均布^[13]:

$$q_v = \frac{a_{v,\max}}{g} q_0 \quad (6)$$

式中 $a_{v,\max}$ 为地表面的最大垂直加速度; g 为重力加速度; q_0 为非地震作用时隧道的垂直均布压力,可由规范计算。

由结构力学中的力法可求解任意截面的内力:

$$\begin{cases} M_1 = 0.25q_v R^2 \cos 2\theta \\ N_1 = q_v R \sin^2 \theta \\ Q_1 = -0.5q_v R \sin 2\theta \end{cases} \quad (7)$$

式中 $R = 0.5(R_1 + R_2)$, R_1 为衬砌结构的内半径, R_2 为衬砌结构的外半径。

2.2.2 水平地震作用下的衬砌内力

根据地震时剪切波的传播规律^[13],其应力状态如图2(a)所示,等价应力状态如图2(b)所示,则水平地震作用 $q_h = \sigma_1 = -\sigma_2 = \tau$ 。

Seed 和 Zdriss 建议 τ 采用式(8)计算^[13-14]:

$$\tau = 0.65 \frac{a_{h,\max}}{g} \sigma'_c r_d \quad (8)$$

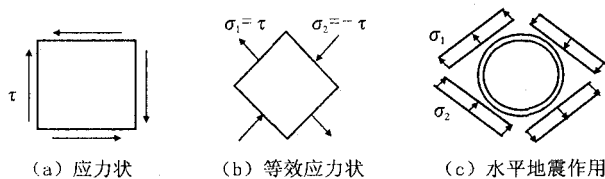


图2 水平地震作用分析

Fig.2 Analysis of horizontal seismic load.

式中 $a_{h,max}$ 为地表面最大水平加速度; r_d 为动力衰减因子; σ'_e 为距地表 z 处上覆土层有效应力,按 $\sigma'_e = \rho z - u_g$; u_g 为地震下孔隙水压力的增量。

对于干燥的砂土, Daniel P. Radel 通过实验分析^[13,15], 建议 τ 采用式(9)计算:

$$\tau = 0.65 \frac{a_{h,max}}{g} \rho z \frac{z_0^2}{z_0^2 + z^2} \quad (9)$$

式中 z_0 为参考深度。

根据垂直地震作用下的计算原理, 可得水平地震作用下的隧道衬砌的内力如下:

$$\begin{cases} M_2 = 0.25q_h R^2 \sin 2\theta \\ N_2 = -q_h R \sin 2\theta \\ Q_2 = q_h R \cos 2\theta \end{cases} \quad (10)$$

2.2.3 地震时孔隙水压力的增量作用下的衬砌内力

地震时孔隙水压力的增量作用下的衬砌受力分析如图3所示。

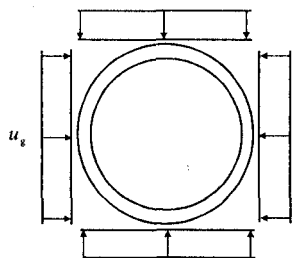


图3 孔隙水压力作用分析

Fig.3 Analysis of water pore pressure.

对于饱和砂土, Finn 等根据在不等压固结情况下进行动三轴试验^[13], 建议 u_g 采用式(11)计算:

$$u_g = 0.5\sigma'_{3c} + \frac{\sigma'_{3c}}{\pi} \arcsin \left[\left(\frac{N}{N_{50}} \right)^{1/a} - 1 \right] \quad (11)$$

式中 N_{50} 为孔隙水压力为 σ'_{3c} 时的加载次数; N 为周期加载的次数; $a = 3k_c - 2$, 为与土性质有关的试验参数; $k_c = \sigma'_{1c}/\sigma'_{3c}$, σ'_{1c} 、 σ'_{3c} 分别为轴向、侧向有效固结压力。

对于粘性土^[13], u_g 可采用经验公式(12)计算:

$$u_g = \sigma'_0 m N^n \quad (12)$$

式中 σ'_0 为初始平均有效应力; m 、 n 分别为通过试

验确定的参数, 在没有试验的情况下, 可根据表1选取^[13]。

表1 黏土参数 m 、 n 的取值

	淤泥质粘土	粉质粘土	硬粘土
m	$0.274r^{0.767}$	$0.273r^{0.711}$	$0.213r^{0.842}$
n	$0.375r^{0.431}$	$0.348r^{0.394}$	$0.265r^{0.538}$

表中 r 为动剪应力与初始平均有效应力的比值, 取值为 0.2 ~ 0.3。

同理可得地震时孔隙水压力增量作用下的隧道衬砌的内力如下:

$$\begin{cases} M_3 = 0 \\ N_3 = u_g R \\ Q_3 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

2.3 非地震时的衬砌内力计算

非地震时的内力情况如简图4所示。

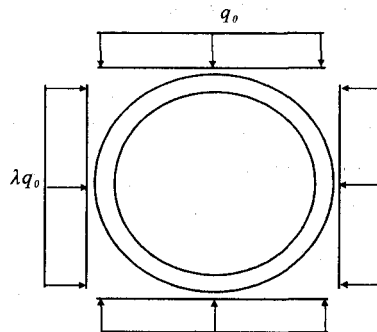


图4 非地震时衬砌受力分析

Fig.4 Force analysis in non-earthquake.

图中 q_0 为垂直均匀压力; λ 为侧压力系数, 可参照规范进行取值与计算。

同理可得非地震时的隧道衬砌的内力如下:

$$\begin{cases} M_0 = 0.25(1 - \lambda) q_0 R^2 \cos 2\theta \\ N_0 = q_0 R (\sin^2 \theta + \lambda \cos^2 \theta) \\ Q_0 = -0.5(1 - \lambda) q_0 R \sin 2\theta \end{cases} \quad (14)$$

2.4 地震时的衬砌内力计算

根据叠加原理, 地震时衬砌结构内力如下:

$$\begin{cases} M = M_0 + M_1 + M_2 + M_3 \\ N = N_0 + N_1 + N_2 + N_3 \\ Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3 \end{cases} \quad (15)$$

3 地震时隧道衬砌内力的敏感性分析

3.1 衬砌内力对垂直地震作用的敏感性

根据式(4)、(6)、(7)、(15)可得, 衬砌内力对垂直地震作用的敏感度函数为

$$S_{M-q_v} = \left| \frac{\partial M}{\partial q_v} \right| = 0.25R^2 |\cos 2\theta|$$

$$S_{N-q_v} = \left| \frac{\partial N}{\partial q_v} \right| = R | \sin^2 \theta |$$

$$S_{Q-q_v} = \left| \frac{\partial Q}{\partial q_v} \right| = 0.5R | \sin 2\theta |$$

对各敏感度函数分析可知:

(1) 衬砌内力(弯矩、轴力、剪力)对垂直地震作用的敏感性只与结构本身有关,而与垂直地震作用的大小无关;

(2) 在 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 时,即拱顶、左边墙中部、右边墙中部、仰拱中部,弯矩对垂直地震作用的敏感性最大;

(3) 在 $\theta = 90^\circ, 270^\circ$ 时,即左、右边墙中部,轴力对垂直地震作用的敏感性最大;

(4) 在 $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 时,即左右拱脚、左右墙脚部位,剪力对垂直地震作用的敏感性最大。

3.2 衬砌内力对水平地震作用的敏感性

根据式(4)、(8)、(9)、(10)、(15)可得,衬砌内力对水平地震作用的敏感度函数为

$$S_{M-q_h} = \left| \frac{\partial M}{\partial q_h} \right| = 0.5R^2 | \sin 2\theta |$$

$$S_{N-q_h} = \left| \frac{\partial N}{\partial q_h} \right| = R | \sin 2\theta |$$

$$S_{Q-q_h} = \left| \frac{\partial Q}{\partial q_h} \right| = R | \cos 2\theta |$$

对各敏感度函数分析可知:

(1) 衬砌内力(弯矩、轴力、剪力)对水平地震作用的敏感性只与结构本身有关,而与水平地震作用的大小无关;

(2) 在 $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 时,即左右拱脚、左右墙脚部位,弯矩对水平地震作用的敏感性最大;

(3) 在 $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 时,即左右拱脚、左右墙脚部位,轴力对水平地震作用的敏感性最大;

(4) 在 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 时,即拱顶、左边墙中部、右边墙中部、仰拱中部,剪力对水平地震作用的敏感性最大。

3.3 衬砌内力对地震时孔隙水压力增量的敏感性

根据式(4)、(11)、(12)、(13)、(15)可得,衬砌内力对地震时孔隙水压力增量的敏感度函数为

$$S_{M-u_g} = \left| \frac{\partial M}{\partial u_g} \right| = 0$$

$$S_{N-u_g} = \left| \frac{\partial N}{\partial u_g} \right| = R$$

$$S_{Q-u_g} = \left| \frac{\partial Q}{\partial u_g} \right| = 0$$

对各敏感度函数分析可知:

(1) 衬砌内力(弯矩、轴力、剪力)对地震时孔隙水压力增量的敏感性只与结构本身有关,而与地震时孔隙水压力增量的大小无关;

(2) 弯矩、剪力对地震时孔隙水压力增量的敏感性为0;

(3) 衬砌结构各部位的轴力对地震时孔隙水压力增量的敏感性一样,为隧道的半径 R 。

3.4 衬砌内力对非地震时围岩压力的敏感性

根据式(4)、(14)、(15)可得,衬砌内力对非地震时围岩压力的敏感度函数为

$$S_{M-q_0} = \left| \frac{\partial M}{\partial q_0} \right| = 0.25R^2 | 1 - \lambda | | \cos 2\theta |$$

$$S_{N-q_h} = \left| \frac{\partial N}{\partial q_h} \right| = R(\sin^2 \theta + \lambda \cos^2 \theta)$$

$$S_{Q-q_h} = \left| \frac{\partial Q}{\partial q_h} \right| = 0.5R | 1 - \lambda | | \sin 2\theta |$$

对各敏感度函数分析可知:

(1) 衬砌内力(弯矩、轴力、剪力)对非地震时围岩压力的敏感性与侧压力系数、结构本身有关,而与围岩压力的大小无关;

(2) 随着侧压力系数的增加,衬砌内力的敏感性降低,当侧压力系数为1时,即为静水压力(球应力)状态,弯矩、剪力对围岩压力的敏感性为0;

(3) 在 $\theta = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 时,即拱顶、左边墙中部、右边墙中部、仰拱中部,弯矩对围岩压力的敏感性最大;

(4) 在 $\theta = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ 时,即左右拱脚、左右墙脚部位,剪力对围岩压力的敏感性最大。

4 工程应用实例

选用1994年Northridge地震时软土中的盾构隧道^[13]。地震引起地表面某测站最大水平与竖直加速度分别为0.38 g、0.31 g。有关计算参数如下:

$$R_1 = 4.7 \text{ m}, R_2 = 5.1 \text{ m}, R = 4.9 \text{ m};$$

$$q_0 = 2.05 \times 10^5 \text{ N/m}^2; z = 35.6 \text{ m};$$

$$\gamma = 17.8 \times 10^5 \text{ N/m}^3; \lambda = 0.59;$$

$$q_v = 0.37 \times 10^5 \text{ N/m}^2; r = 0.25 \text{ m}。$$

代入各敏感性公式可得

$$(1) \text{ 衬砌内力对垂直地震作用的敏感度为}$$

$$S_{M-q_v} = 6 | \cos 2\theta |, S_{N-q_v} = 4.9 | \sin^2 \theta |,$$

$$S_{Q-q_v} = 2.45 | \sin 2\theta |$$

(2) 衬砌内力对水平地震作用的敏感度为

$$S_{M-q_h} = 12 |\sin 2\theta|, S_{N-q_h} = 4.9 |\sin 2\theta|,$$

$$S_{Q-q_h} = 4.9 |\cos 2\theta|$$

(3) 衬砌内力对地震时孔隙水压力增量的敏感度为

$$S_{M-u_g} = 0, S_{N-u_g} = 4.9, S_{Q-u_g} = 0$$

(4) 衬砌内力对非地震时围岩压力的敏感度为

$$S_{M-q_0} = 2.46 |\cos 2\theta|, S_{N-q_0} = 4.9 (\sin^2 \theta + 0.59 \cos^2 \theta),$$

$$S_{Q-q_0} = \left| \frac{\partial Q}{\partial q_h} \right| = \sin 2\theta$$

对以上结果分析可知:

(1) 弯矩对水平地震作用的敏感性最大,为12;其次为垂直地震作用,为6;

(2) 剪力对水平地震作用的敏感性最大,为4.9;

(3) 轴力对各因素的敏感性的最大值一样,为4.9。

综上,衬砌内力对水平地震作用最为敏感,这与我我国铁路隧道规范和公路隧道规范中关于地震作用时只考虑水平地震作用相一致。

5 结论

(1) 衬砌内力对围岩压力的敏感性与其大小无关,而与隧道形状、侧压力系数有关,并随着侧压力系数的增加而敏感性降低。通常情况下侧压力系数随着埋深的增加而增加,从而在理论上证明了浅埋隧道对地震更具有的敏感性,建议在地震区应注重改善隧道的围岩压力分布。

(2) 衬砌内力对垂直地震作用、水平地震作用、地震时孔隙水压力增量的敏感性与其大小无关,只与隧道结构本身有关,并且衬砌内力对水平地震作用的敏感性最大,因而建议在地震区应该注重改善隧道的结构形状;

(3) 衬砌的弯矩、剪力对地震时孔隙水压力增量的敏感性为零,增加的孔隙水压力有助于改善隧道的受力(因为水压为球应力状态,增大隧道的轴力而不影响其弯矩,如同常规计算中应按底水位计算衬砌内力,而不是高水位计算衬砌内力);若考虑水对围岩的弱化、地震液化等因素,孔隙水压力的存在是不利的。

本文研究对象为圆形隧道,对于其它形状的隧

道可以通过保角映射变换进行求解;本文重点研究地震时衬砌的受力,未考虑地震时围岩的影响(土的振动液化)、围岩抗力的影响、及荷载为非均布时的情况,这些都有待进一步研究。

[参考文献]

- [1] 李应斌,林艺勇,刘洋. 抗震设计中结构的极限状态与性能目标[J]. 西北地震学报, 2004, 26(1):24-27.
- [2] 刘红玫,林学文. 甘肃省农村各种结构类型房屋的地震破坏机理[J]. 西北地震学报, 2007, 29(1):75-79.
- [3] Hwang Jin-Hung, Lu Chih-Chieh. Seismic capacity assessment of old Sanyi railway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22(4): 433-449.
- [4] Pakbaz Mohammad C. 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005, 20(5): 411-417.
- [5] Konagai K, Kim D S. Simple evaluation of the effect of seismic isolation by covering a tunnel with a thin flexible material[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2001, 21(4): 287-295.
- [6] 严松宏,高波,潘昌实. 地震作用下沉管隧道接头力学性能分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 286-289.
- [7] 陈贵红,李玉文. 地震区公路隧道洞门设计[J]. 公路, 2003(10): 19-22.
- [8] 李云鹏,王芝银,韩常领,等. 考虑地震影响的小间距隧道围岩流变损伤[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(2): 51-56.
- [9] 杨小礼,张丙强,王志斌,等. 浅埋大跨度连拱隧道地震反应分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(5): 991-996.
- [10] 刘晶波,李彬,谷音. 地铁盾构隧道地震反应分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(6): 757-760.
- [11] 许增会,宋宏伟,赵坚. 地震对隧道围岩稳定性影响的数值模拟分析[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(1): 41-44.
- [12] 杨为民,李术才,李晓静. 参数敏感性分析方法及其在琅琊山蓄能电站地下厂房工程中的应用[A]//鲁东大学首届岩土与地下工程科技研讨会论文集[C]. 北京:北京交通大学出版社, 2005.
- [13] 杨小礼,李亮,刘宝琛. 强震作用下交通隧道的拟静态反应[J]. 中国公路学报, 2001, 14(4): 55-58.
- [14] SEED B, ZDRISS M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, American Society of Civil Engineering, 1971, 97(9): 1249-1274.
- [15] DANIEL P ADEL. Procedure to evaluate earthquake-induced settlements in dry sandy soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 364-368.