

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201908011

# 基于修正惯用法的埋深对圆形隧道地震反应影响\*

马超<sup>1</sup>, 路德春<sup>2</sup>, 戚承志<sup>1</sup>, 杜修力<sup>2</sup>

(1. 北京建筑大学北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 102616;  
2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 采用修正惯用法, 在考虑土拱效应对圆形隧道结构受力状态影响的基础上, 研究了埋深对地下结构地震反应的影响规律。首先, 对比分析了不考虑和考虑土拱效应时、地震荷载作用前, 隧道结构内力分布及随埋深的变化规律; 将作用于隧道结构上的水平地震荷载等效为围岩土体变形导致的土压力的改变值; 继而探讨了考虑土拱效应后, 地震荷载引起的隧道结构内力的改变, 研究了不同地震动强度下, 埋深对圆形隧道结构地震反应的影响规律。研究结果显示, 地震作用下, 圆形隧道结构的内力随着埋置深度的增加呈现出先增大后减小或趋于稳定的趋势, 即圆形隧道结构地震反应存在一个抗震关键埋深。

**关键词:** 圆形隧道; 内力; 土拱效应; 一维场地分析; 抗震关键埋深

**中图分类号:** TU443   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0171-09

## Seismic Performance of Circle Tunnels Affected by Buried Depth Based on Modified Routine Method

MA Chao<sup>1</sup>, LU Dechun<sup>2</sup>, QI Chengzhi<sup>1</sup>, DU Xiuli<sup>2</sup>

(1. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. Key Lab of Urban Security and Disaster Engineering, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** By taking into account the arch effect influencing the internal forces within circular tunnels, the seismic performance of tunnels affected by the buried depth was discussed based on the modified routine method. The internal force distributions of tunnel structure and their variations with buried depth before the earthquake considering and without considering soil arching effect are compared and analyzed. The seismic loads imposed on the tunnel are equivalent to the change in soil pressure caused by the deformation of surrounding soils. Then the internal forces within the tunnels caused by the seismic loads with different earthquake intensities are illustrated by considering the arch effect, and the buried depth influencing the seismic performance of tunnels is analyzed. It presents that, the internal forces within the tunnel get larger with the increase in buried depth and then decrease or became stable. There is a critical buried depth for the seismic performance of the

\* 收稿日期: 2019-08-04; 修回日期: 2019-09-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808028)、北京市自然科学基金项目(8212007)、北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金(X20158)资助

作者简介: 马超(1986—), 男, 副教授, 博士。主要从事岩土力学与城市地下结构防震减灾方面的研究。

E-mail: machao@bucea.edu.cn

circular tunnel.

**Keywords:** circular tunnel; internal force; soil arch effect; 1D seismic site response analysis; critical depth for seismic design

## 引言

地震作用过程中,隧道结构不仅要承担结构上覆土体的重力荷载,还要承担由于地震荷载引起的围岩土体的惯性力和变形。受场地条件、既有地下结构等的影响,地铁车站之间的隧道结构在不同位置处的埋深差异较大,继而不同埋深处隧道结构的地震反应也不尽相同<sup>[1-2]</sup>。因此,开展埋深对隧道结构地震反应影响规律的研究,对于隧道结构抗震设计具有重要的理论与现实意义。

关于埋深对隧道结构地震反应的影响开展了大量震害调查<sup>[3]</sup>、试验<sup>[4-5]</sup>和数值<sup>[6-7]</sup>等研究,但仍然没有形成统一的认识。目前,对于埋深对地下结构地震反应的影响规律有三类认识:一是地下结构埋深越浅,其地震反应越强烈<sup>[8-11]</sup>;二是深埋地下结构在地震中的受力和变形较浅埋结构更大<sup>[4-5, 12-13]</sup>,模型试验中获得的该规律尤为突出;三是地下结构存在一个地震反应最不利埋深<sup>[6-7, 14]</sup>。导致出现认识上分歧的主要原因之一,是忽略了地震荷载作用前地下结构的初始受力状态。

地震荷载作用前,隧道结构与围岩土体处于静力平衡状态。而隧道等地下结构在修建过程中,由于超挖,围岩土体不可避免地要发生变形和传力路径的改变,在此过程中,土拱效应会逐渐形成<sup>[15]</sup>,此时,作用于地下结构的竖向荷载往往小于上覆土体的重力。采用模型试验研究隧道结构地震反应时,如果不模拟隧道的开挖过程,很难获得合理的隧道结构地震发生前的初始受力状态。而在数值模拟中,多数研究者计算隧道结构和围岩土体初始受力状态时,也往往忽略了隧道超挖引起的受力状态的改变,这样的做法默认了隧道结构承担了几几乎所有上覆土体的重力荷载。这样获得的结构和围岩土体的初始受力状态,在分析埋深非常浅的隧道结构时较为适用,或采用线弹性理论进行地下结构地震反应分析时也较为适用。然而,在分析中等埋深或深埋结构时,地下结构的

初始受力状态偏大,有时甚至超出结构的承载能力。因此,在此基础上研究地下结构的地震反应规律,获得的结论缺乏说服力<sup>[6]</sup>。C.Ma等<sup>[6]</sup>采用数值模拟的方法,分析了矩形地下结构因超挖引起的结构受力状态的改变,得出地震荷载作用前,结构承担的荷载随着埋深的增加而趋于某一最大值,在此基础上探讨了埋深对矩形地下结构地震反应的影响规律,计算获得了地下结构存在抗震最不利埋深。

姚超凡等<sup>[16]</sup>在分析盾构隧道内力时指出,修正惯用法概念清晰,计算简便,计算结果偏于安全,可作为隧道内力计算的简要方法。本文采用修正惯用法,在考虑土拱效应对隧道结构受力状态影响的基础上,探讨埋深对均一土层中圆形隧道结构地震反应的影响规律。分析结果可以为不同埋深处隧道结构抗震设计提供针对性建议。

## 1 修正惯用法

在平面假定条件下,隧道结构在地层中受到的土压力示意如图1所示。土压力自结构顶部至底部逐渐增加。采用修正惯用法求解结构内力时,可将作用结构上的土压力简化为如图2所示的受力图<sup>[17-18]</sup>。

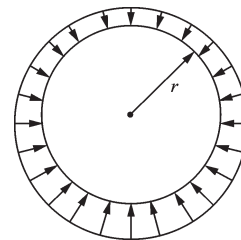


图1 隧道结构受荷示意图

Fig.1 Sketch of the loads imposed on a tunnel

当仅有重力荷载作用时,由于隧道结构及其外荷载均为轴对称形式,因此隧道结构内力求解可简化为如图3所示的基本结构,以隧道顶部中心界面处弯矩和轴力为基本未知量,采用力法求解的方

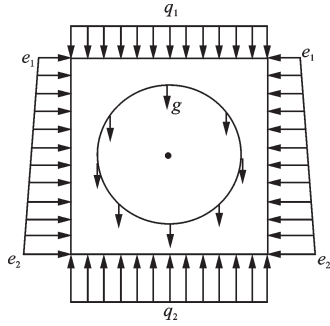


图2 隧道结构简化计算受荷

Fig.2 Sketch of the simplified loads imposed on a tunnel  
注:  $q_1$  为隧道顶部地层竖向压力;  $q_2$  为隧道底部地层竖向压力;  $g$  为结构自重;  $e_1$ 、 $e_2$  分别为隧道顶部和底部水平土压力;  $r$  为隧道半径

程为:

$$\begin{cases} \delta_{11} X_1 + \Delta_{1p} = 0 \\ \delta_{22} X_2 + \Delta_{2p} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $X_1$  和  $X_2$  分别为隧道顶部中心处未知弯矩和轴力;  $\delta_{11}$  和  $\delta_{22}$  为柔度系数;  $\Delta_{1p}$  和  $\Delta_{2p}$  分别为静定结构在外荷载作用下的转角和轴向变形。任意角度  $\theta$  (为隧道上任一点和隧道圆心的连线与拱顶和隧道圆

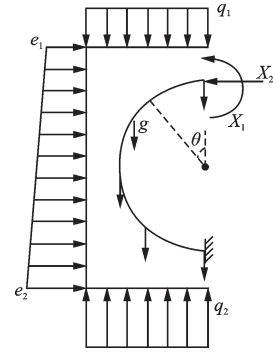


图3 内力计算

Fig.3 Sketch of simplified calculation of the internal forces

心连线之间的夹角)隧道的截面弯矩( $M$ )、轴力( $N$ )和剪力( $Q$ )可表示为:

$$\begin{cases} M(\theta) = X_1 - X_2 r \cos \theta + M'(\theta) \\ N(\theta) = X_2 \cos \theta + N'(\theta) \\ Q(\theta) = X_2 \sin \theta + Q'(\theta) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $M'(\theta)$ 、 $N'(\theta)$  和  $Q'(\theta)$  为图3所示的基本结构内力,其大小见表1。求解式(1)可得:

$$\begin{cases} X_1 = gr^2 + \frac{(1 - \pi/8)q_1 r^2}{\pi} + \frac{3e_1 r^2}{4} + \frac{5e_2 r^2}{24} + \left(\frac{3}{8} - \frac{1}{\pi}\right)q_2 r^2 \\ X_2 = -\frac{gr}{2} - \frac{q_1 r}{3\pi} + e_1 r + \frac{5e_2 r}{16} + \frac{q_2 r}{3\pi} \end{cases} \quad (3)$$

## 2 不考虑土拱效应隧道结构受力分析

当不考虑地层损失导致的土拱效应时,结构顶部受到的竖向土压力为  $q_1 = \gamma h$ 。其中,  $\gamma$  为土体的重度,  $h$  为结构顶部埋深,  $e_1 = (1 - \sin \varphi)q_1$ ,  $e_2 = 2\gamma r$ ,  $q_2 = \gamma(h + 2r)$ 。假定围岩土体  $\gamma = 19$  kN, 摩擦角

$\varphi = 30^\circ$ , 隧道  $r = 4$  m, 管片厚度  $D = 0.3$  m。根据表1列出的结构内力, 联合式(2)~(3), 当  $h = 9$  m 时, 获得的隧道弯矩和轴力如图4所示。由图可知, 隧道结构拱底处的正弯矩最大, 拱腰处的负弯矩最大, 拱肩和拱脚处的弯矩值约为零; 隧道结构各处轴力均为压力, 最大值出现在拱腰处, 最小值出现在拱顶和拱底部。

表1 结构内力计算式

Table 1 Equations for calculating the internal forces within tunnels

荷载	适用范围	$M'(\theta) / (\text{kN} \cdot \text{m})$	$N'(\theta) / \text{kN}$	$Q'(\theta) / \text{kN}$
$q_1$	$(0, \pi/2)$	$-q_1 r^2 \sin^2 \theta / 2$	$q_1 r \sin^2 \theta$	$q_1 r \sin \theta \cos \theta$
	$(\pi/2, \pi)$	$q_1 r^2 (1/2 - \sin \theta)$	$q_1 r \sin \theta$	$q_1 r \cos \theta$
$e_1$	$(0, \pi)$	$-e_1 r^2 (1 - \cos \theta)^2 / 2$	$-e_1 r (1 - \cos \theta) \cos \theta$	$-e_1 r (1 - \cos \theta) \sin \theta$
$e_2$	$(0, \pi)$	$-e_2 r^2 (1 - \cos \theta)^3 / 12$	$-e_2 r (1 - \cos \theta)^2 \cos \theta / 4$	$-e_2 r (1 - \cos \theta)^2 \sin \theta / 4$
$g$	$(0, \pi)$	$-gr^2 (\theta \sin \theta + \cos \theta)$	$gr \theta \sin \theta$	$gr \theta \cos \theta$
$q_2$	$(0, \pi/2)$	0	0	0
	$(\pi/2, \pi)$	$-q_2 r^2 (1 - \sin \theta)^2 / 2$	$-q_2 r (1 - \sin \theta) \sin \theta$	$-q_2 r (1 - \sin \theta) \cos \theta$

注: 隧道内侧受压时弯矩为正, 外侧受压为负

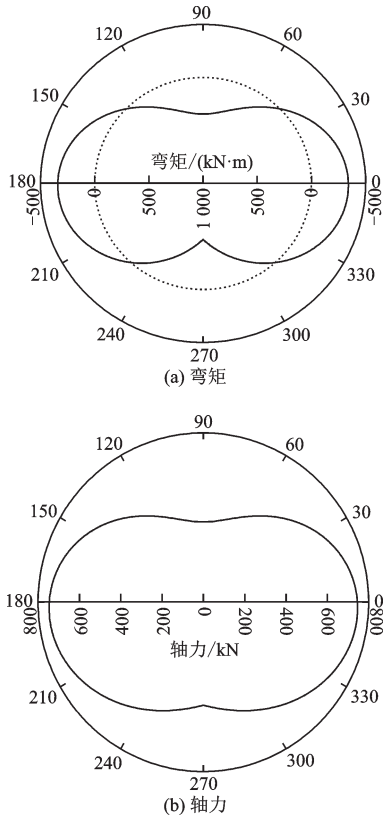


图4 埋深为9 m时隧道弯矩及轴力  
Fig.4 Internal forces within the tunnel when the buried depth is 9 m

图5给出了上述假定中,隧道拱腰和拱底处弯矩与埋深间的关系。由图可知,地震荷载作用前,隧道内力大小随其埋深增大而线性增大。显然,地震荷载作用时,地震引起的结构内力与重力荷载引起的隧道结构内力叠加,这也将导致隧道结构的地震反应随着埋深的增加而增大。这种隧道结构受到的内力随着结构埋深的增加而无限增大的规律,显然与结构所处的真实受力状态不符。在此基础上研究地下结构的地震反应规律,获得的结论缺乏说服力。

$$q_1 = \begin{cases} \frac{4R^2 - \pi r^2}{8r} \gamma, & 0 \leq h < \left( \frac{n\sqrt{2}}{2} - 1 \right) r \\ \left[ \frac{\pi R^2}{8r} - \frac{\pi r}{8} + \frac{h+r}{2r} \sqrt{R^2 - (h+r)^2} - \frac{R^2}{2r} a \cos \frac{h+r}{R} \right] \gamma, & \left( \frac{n\sqrt{2}}{2} - 1 \right) r \leq h < nr \\ \left( \frac{\pi R^2}{8r} - \frac{\pi r}{8} \right) \gamma, & h \geq nr \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $n$  为土拱半径大小与隧道半径的大小倍数关

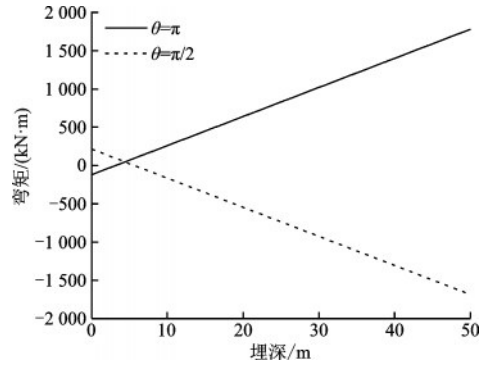


图5 隧道底部弯矩与埋深之间的关系  
Fig.5 Relations between the buried depth and the bending moment at the tunnel bottom

### 3 考虑土拱效应时结构受力状态

研究表明,当地层损失率为0.5%时<sup>[6, 19]</sup>,土压力拱完全形成,这时作用于隧道结构上的竖向土压力约为塌落拱下土体的重力,而土压力拱的半径( $R$ )约为隧道结构半径( $r$ )的3~5倍<sup>[19]</sup>。在考虑土拱效应后,求解不同埋深处隧道结构的内力时,给出以下假设:

- (1) 结构发生小变形,满足叠加原理;
- (2) 仅考虑土体和结构重力,忽略水压力;
- (3) 塌落土体重力均匀施加在结构上;
- (4) 土体塌落区域为隧道结构圆心沿45°角斜向上的区域。

根据土拱大小与地表之间的位置关系,将力学分析模型划分为如图6所示的三种工况,分别为:

- (1)  $0 \leq h + r < R/\sqrt{2}$ ,如图6(a)所示;
- (2)  $R/\sqrt{2} \leq h + r < R$ ,如图6(b)所示;
- (3)  $h + r \geq R$ ,如图6(c)所示,此时土拱完全处于地表以下。

计算出不同埋深处隧道结构承受的竖向土压力为:

系。此时,  $q_2$  的大小等于  $q_1$  加上隧道结构的重力。

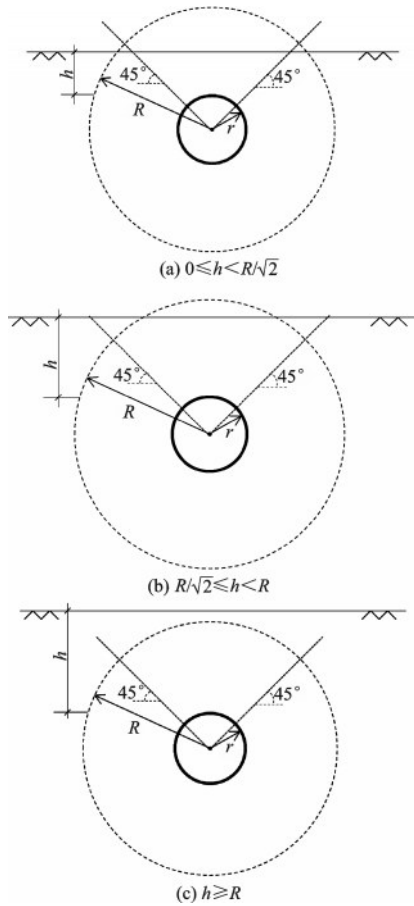


图6 土拱与地表之间的关系

Fig.6 Relations between the buried depth and the soil arch

当考虑  $R=3r$  ( $n=3$ ) 和  $R=5r$  ( $n=5$ ) 时,  $q_1$  随埋深的变化规律如图7所示。地震荷载作用前, 作用于隧道结构上覆土体的重力荷载, 随着结构的埋深逐渐增大, 当隧道埋深等于  $R-r$  时, 达到最大值, 此后随着埋深的增加, 作用于隧道结构上的竖向荷载不再增大。

当  $R=3r$  和  $h=20$  m 时, 隧道结构的弯矩与轴

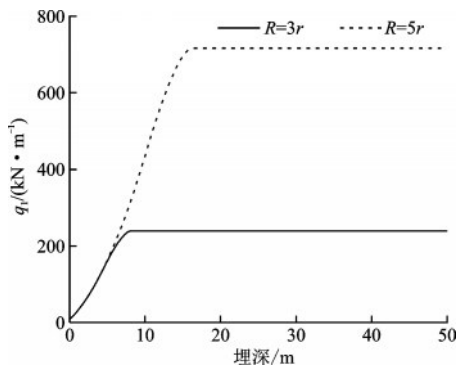


图7  $q_1$  与埋深之间的关系

Fig.7 Relations between  $q_1$  and buried depth

力如图8所示。与不考虑土拱效应相比, 隧道结构轴力和弯矩的最大值出现在相同的位置, 即拱底的正弯矩最大, 拱腰处的负弯矩最大, 轴力最大值出现在拱腰处, 最小值出现在拱顶和拱底部。不同的是, 隧道结构的内力不随埋深而线性增大, 图9给出了  $R=3r$  和  $R=5r$  时, 隧道拱底处弯矩随埋深的变化规律, 弯矩在  $h=8\sim 16$  m 时达到最大, 约为土拱效应完全形成时对应的埋深。

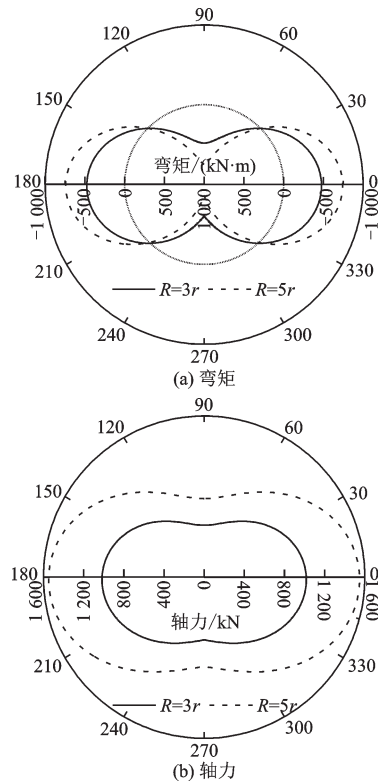


图8 埋深为20 m时隧道弯矩及轴力

Fig.8 Distribution of bending moments and axial forces within the tunnel when the buried depth is 20 m

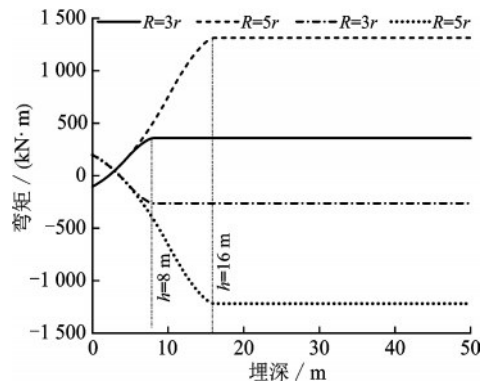


图9 隧道底部弯矩与埋深之间的关系

Fig.9 Relations between the buried depth and the bending moment at the tunnel bottom

## 4 埋深对结构地震反应的影响规律

由于地下结构的赋存环境与地上结构不同,地下结构的地震反应振动特性不明显,水平地震荷载主要以围岩土体的变形作用于结构上,从而引起结构的反应<sup>[20]</sup>。因此,本文在求解隧道结构的地震反应时,忽略地震引起的隧道结构惯性力。水平地震荷载引起的作用于隧道结构上的水平剪切荷载,可等效为土体变形引起的作用于隧道结构上的土压力<sup>[21]</sup>,土压力的大小 $q_s$ 为:

$$q_s = G\gamma \quad (5)$$

式中, $G$ 为土体剪切模量; $\gamma$ 为土体剪切应变。

假定土压力呈倒三角型分布,如图10所示。 $\gamma$ 为地震中拱顶与拱底相对位移的最大值除以隧道直径。

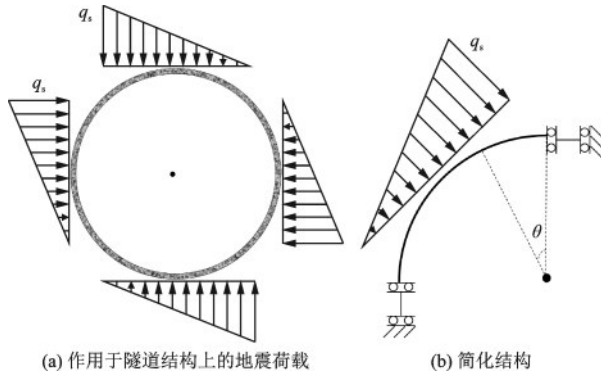


图10 水平地震荷载分布

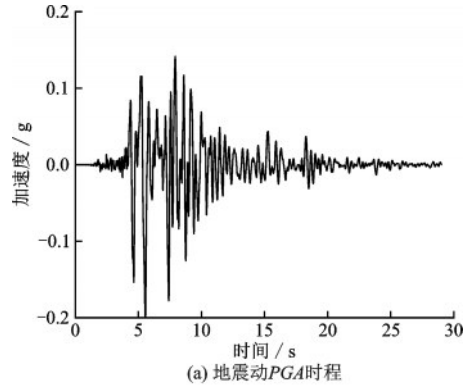
Fig.10 Horizontal seismic loads imposed on the tunnel

为了方便计算,在求解过程中,将实际结构进行了 $45^\circ$ 旋转,式(6)表述的角度( $\theta$ )对应结构任一点和圆心连线与拱顶和圆心连线的夹角,如图10所示。求解可得地震荷载引起的简化分析隧道结构的内力为( $0 \leq \theta \leq \pi/2$ ):

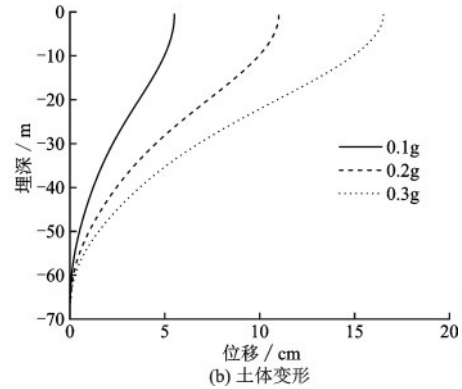
$$\begin{cases} M(\theta) = \left( \frac{1}{9\pi} - \frac{1}{2} \sin \theta - \frac{2}{3} \cos^3 \theta \right) q_s r^2 \\ N(\theta) = -\frac{\sin \theta}{2} q_s r - \frac{\cos^2 \theta}{4 \sin^2 \left( \theta + \frac{\pi}{4} \right)} (\sin \theta - \cos \theta) q_s r \\ Q(\theta) = -\frac{\cos \theta}{2} q_s r - \frac{\cos^2 \theta}{4 \sin^2 \left( \theta + \frac{\pi}{4} \right)} (\sin \theta + \cos \theta) q_s r \end{cases} \quad (6)$$

采用如图11(a)所示的阪神地震记录进行一维场地分析,将地震动PGA调整为0.1g、0.2g和0.3g,

根据《城市轨道交通结构抗震设计规范(GB 50909—2014)》<sup>[22]</sup>,假定基岩处于地下70m处,计算获得的土体水平向变形与埋深之间的关系如图11(b)所示。由图可知,基岩处场地的位移为零,地表处场地位移最大,场地各处的位移随着埋深的增加而逐渐减小。



(a) 地震动PGA时程



(b) 土体变形

图11 一维场地分析

Fig.11 One-Dimensional site response analysis

当 $h=20$  m、 $R=3r$ ,PGA分别为0.1g、0.2g和0.3g时,获得的隧道结构弯矩和轴力图如图12所示。与地震作用前结构的内力相比,不同强度地震荷载作用下,结构的内力变化不明显,说明随着地震荷载的增加,隧道结构的内力增大值小于其初始值。此外,隧道弯矩和轴力发生了偏转,即结构产生了水平剪切变形。

$R=3r$ 和 $R=5r$ 隧道不同位置处( $\theta=0$ 为拱顶、 $\theta=\pi/2$ 为拱腰、 $\theta=\pi$ 为拱底)的弯矩和轴力与埋深之间的关系如图13所示(地震动PGA为0.1g)。对比分析相同埋深处隧道拱底弯矩在地震荷载发生前后的大小(如图9与图13所示)可知,对于本文研究的结构,地震荷载引起的隧道弯矩的增加值约为隧道总弯矩的30%。

由图13所示埋深对隧道结构地震反应的影响

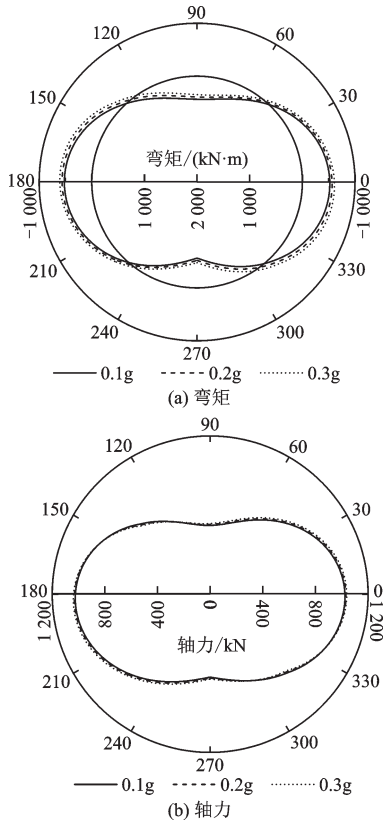


图 12 地震合作作用下埋深为 20 m 时隧道弯矩及轴力  
Fig.12 Distribution of bending moments and axial forces within the tunnel with a buried depth of 20 m under seismic loads

规律可知,隧道结构地震反应存在一个抗震关键埋深,即埋深对隧道结构地震反应的影响规律,在抗震关键埋深处存在突变。拱顶和拱底处的弯矩随着埋深的增加而增加,当达到某一埋深时,增大不再显著;而拱腰处的负弯矩随着埋深的增加而呈现出先增大后减小的趋势;结构轴力则随着埋深的增加而增加随后略有减小。由计算结果可知,隧道结构的抗震关键埋深介于  $3r \sim 5r$  之间。

$R=3r$  时,隧道结构拱腰处在不同地震强度下的弯矩和轴力与埋深之间的关系如图 14 所示。图 14(a) 显示。结构弯矩的绝对值,随着埋深的增加而呈现出先增大后减小的趋势;隧道埋深为  $3r$  时,其弯矩达到最大值;地震动强度(即  $PGA$ ) 越大,这种减弱的趋势越明显。而结构轴力则随着埋深的增加而增加随后略有减小,同样,地震动强度越大,减弱幅值也越大。因此,当假定  $R=3r$  时,隧道的抗震关键埋深为  $3r$ 。此外,相比较隧道轴力的变化规律,地震引起的结构弯矩的增加值更大。

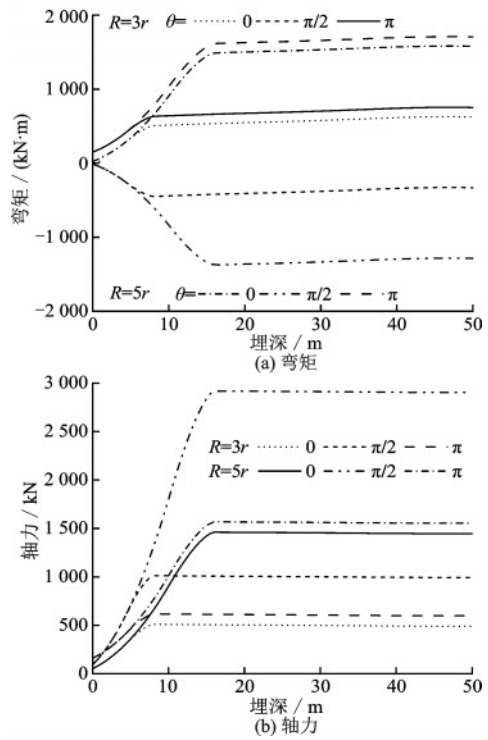


图 13  $PGA=0.1$  时,隧道弯矩及轴力与埋深间的关系  
Fig.13 Relations between the buried depth and internal forces when  $PGA=0.1$

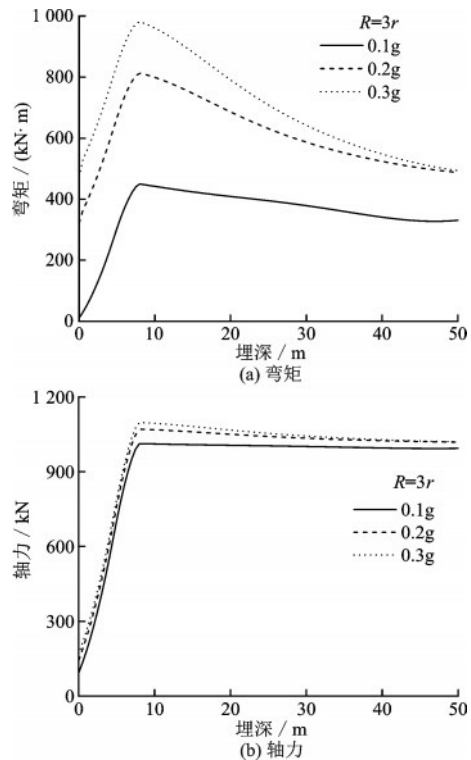


图 14 不同地震动强度作用下,隧道拱腰处弯矩及轴力与埋深间的关系  
Fig.14 Relations between the buried depth and internal forces under different intensities of earthquake

## 5 结 论

隧道埋深是影响其地震反应的主要影响因素之一,以往的数值及试验研究忽视了隧道施工过程中土拱效应对其受力状态的影响,继而获得的埋深对隧道结构地震反应的影响规律缺乏说服力。本文基于修正惯用法,首先探讨了地震荷载作用前,土拱效应对隧道结构内力的影响,在此基础上研究了埋深对圆形隧道结构地震反应的影响规律,得出隧道地震反应存在一个抗震关键埋深,即埋深对隧道结构地震反应的影响规律,在抗震关键埋深处存在突变。获得的主要结论有:

(1) 地震荷载作用前,由于土体重力导致的结构内力随着埋深的增加而增大,当土拱完全形成后,隧道结构内力随其埋深的增加不再改变。

(2) 将作用于隧道结构上的水平地震荷载等效为围岩土体变形导致的土压力。地震荷载导致的隧道结构拱顶和拱底的弯矩,随着埋深的增加先显著增大,达到土拱效应完全形成对应的埋深后,略微增大;隧道拱腰处的弯矩及隧道各处轴力,随着埋深的增加呈现先增大后减小的趋势。隧道结构地震反应存在一个抗震关键埋深,该埋深约等于土拱效应完全形成时对应的埋深。

(3) 地震引起的结构弯矩的增加值大于轴力的变化值。隧道结构在不同地震强度下的地震反应显示,地震强度越大,隧道结构的抗震关键埋深越明显。

### 参考文献:

- [1] 王苏,路德春,杜修力. 地下结构地震破坏静-动力耦合模拟研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3483-3488.  
Wang S, Lu D C, Du X L. Research on underground structure seismic damage using static-dynamic coupling simulation method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3483-3488.(in Chinese)
- [2] 路德春,王欣,罗磊,等. 土与结构接触特性对地下结构地震反应的影响研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(2): 177-186.  
Lu D C, Wang X, Luo L, et al. Research on the seismic responses of underground structures considering the

soil and structure contact [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37 (2) : 177-186.(in Chinese)

- [3] Wang Z Z, Gao B, Jiang Y J, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52 (2) : 546-558.
- [4] Cilingir U, Madabhushi S G. Effect of depth on seismic response of circular tunnels [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, 48(1): 117-127.
- [5] Cilingir U, Madabhushi S G. Effect of depth on the seismic response of square tunnels [J]. Soils and foundations, 2011, 51(3): 449-457.
- [6] Ma C, Lu D C, Du X L, et al. Effect of buried depth on seismic response of rectangular underground structures considering the influence of ground loss [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, 106: 278-297.
- [7] Chen C S, Wang T T, Jeng F S, et al. Mechanisms causing seismic damage of tunnels at different depths [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 28: 31-40.
- [8] Debiassi E, Gajo A, Zonta D. On the seismic response of shallow-buried rectangular structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 99-113.
- [9] Liu H B, Song E X. Seismic response of large underground structures in liquefiable soils subjected to horizontal and vertical earthquake excitations [J]. Computers and Geotechnics, 2005, 32(4): 223-244.
- [10] 刘鸿哲,黄茂松. 不同埋深矩形隧道地震响应的离心振动台试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3404-3412.  
Liu H Z, Huang M S. Centrifuge Model Tests of Seismic Response of Rectangular Tunnels at Different Buried Depths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (Sup2) : 3404-3412. (in Chinese)
- [11] 朱言灯,伍阳,关天定. 埋深对土-地下结构地震反应的影响 [J]. 建筑结构, 2013, 43(增): 1493-1496.  
Zhu Y D, Wu Y, Guan T D. Embedment depth influence on seismic performance of underground structure [J]. Building Structure, 2013, 43 (Sup) : 1493-1496.

- (in Chinese)
- [12] Chian S C, Madabhushi S P G. Effect of buried depth and diameter on uplift of underground structures in liquefied soils [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2012, 41: 181-190.
- [13] 陈勇, 杨庆华. 埋深对地下管道抗震设计的影响 [J]. *世界地震工程*, 2015, 31(2): 275-280.  
Chen Y, Yang Q H. Depth on seismic design of buried pipelines [J]. *World Earthquake Engineering*, 2015, 31(2): 275-280.(in Chinese)
- [14] 董正方, 朱红云, 蔡宝占, 等. 不同埋深处土质场地地下结构地震内力变化规律 [J]. *工程抗震与加固改造*, 2017, 39(5): 143-148.  
Dong Z F, Zhu H Y, Cai B Z, et al. Law of internal force changes for understructures in soil site with different depth under earthquake [J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2017, 39(5): 143-148. (in Chinese)
- [15] Gomes R C. Effect of stress disturbance induced by construction on the seismic response of shallow bored tunnels [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 49 (APR.): 338-351.
- [16] 姚超凡, 晏启祥, 何川, 等. 盾构隧道内力分析方法的对比研究 [J]. *铁道标准设计*, 2013, 12: 95-99.  
Yao C F, Yan Q X, He C, et al. Comparative Study on Internal Force Analysis Methods of Shield Tunnel [J]. *Railway Standard Design*, 2013, 12: 95-99. (in Chinese)
- [17] 郭璇, 孙文波, 张晓新, 等. 地下圆形隧道自由变形法的力法推导及例证 [J]. *铁道学报*, 2014, 36(9): 85-91.  
Guo X, Sun W B, Zhang X X, et al. Deduction and example illustration of calculation structural mechanics forces of underground arch lining with FFD method [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(9): 85-91.(in Chinese)
- [18] 孙波, 傅鹤林, 张加兵. 基于修正惯用法的水下盾构管片的内力分析 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(5): 929-937.  
Sun B, Fu H L, Zhang J B. Internal force analysis of underwater shield segment based on modified routine method [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2016, 13(5): 929-937.(in Chinese)
- [19] 张佩, 路德春, 杜修力, 等. 深埋隧道与浅埋隧道划分方法研究 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(增2): 422-427.  
Zhang P, Lu D C, Du X L, et al. Division method for deep and shallow tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(Sup2): 422-427. (in Chinese)
- [20] Ma C, Lu D C, Du X L, et al. Structural components functionalities and failure mechanism of rectangular underground structures during earthquakes [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 119 (APR.): 265-280.
- [21] Hany El N, Sean D H, Hesham El N. Simplified analysis of seismic in-plane stresses in composite and jointed tunnel linings [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(12): 1063-1077.
- [22] 城市轨道交通结构抗震设计规范: GB 50909-2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.  
(本文责编: 赵霞)