

# 土性参数纵向不均匀对盾构隧道地震 响应影响的初步分析<sup>①</sup>

潘洪科<sup>1</sup>, 王国波<sup>2</sup>, 王亚西<sup>2</sup>

(1.湖北文理学院 建筑工程学院, 湖北 襄阳 441053;

2.武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

**摘要:**目前一般将土体假设为匀质单层模型或匀质分层模型进行研究,不考虑土性参数沿纵向的不均匀分布对隧道等地下结构地震响应的影响。通过某具体工程,建立均匀土体-隧道模型和纵向不均匀土体-隧道模型,计算并对比分析两种工况时结构的相对变形及受力。结果表明:在给定的计算工况下,土性参数纵向不均匀时对隧道结构变形与受力有一定的影响,但影响程度不大,主要原因可能是隧道尺寸较小、地震动幅值较小以及场地条件较好。今后还需进行广泛的参数分析以探讨一般性的规律。

**关键词:** 盾构隧道; 地震响应; 不均匀; 土体-隧道模型

中图分类号: TU91

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)03-0829-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.03.0829

## Preliminary Analysis of the Influence of Longitudinal Non-uniform Distribution of Soil Parameters on the Seismic Response of a Shield Tunnel

PAN Hong-ke<sup>1</sup>, WANG Guo-bo<sup>2</sup>, WANG Ya-xi<sup>2</sup>

(1.School of Building Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang 441053, Hubei, China;

2.Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering; Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** Soil is generally simplified as a uniform one-layer model or uniform multi-layer model in present research works, and the influence of soil parameters that may change along the longitudinal direction during seismic responses is usually neglected. With a focus on a practical engineering, a uniform soil-tunnel model and non-uniform soil-tunnel model were established and the internal structural forces and deformations were calculated and compared. The results showed that soil parameters that changed along the longitudinal direction had some influence on internal structural forces and deformation, but the degree of influence was not significant. The reasons were attributed to the small sizes of the tunnels, the small seismic wave amplitude, and the good soil conditions. The results of this study showed that more general seismic response laws should be discussed in future works, based on extensive parameter analyses.

**Key words:** shield tunnel; seismic response; non-uniform; soil-tunnel model

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51208406); 湖北省自然科学基金项目(2015CFC803); 湖北文理学院科研启动经费项目

作者简介: 潘洪科(1971-), 男, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程方面的研究工作。E-mail: panhk\_sh@126.com。

通信作者: 王国波(1979-), 男, 博士, 主要从事工程结构抗震分析方面的研究工作。E-mail: wgb16790604@126.com。

## 0 引言

地震时盾构隧道管片及接头螺栓的内力主要由强加于其上的地层变形引起,而盾构隧道是由管片通过纵向和环向螺栓连接而成,在土性发生较大变化的截面处,土体将产生较大的不均匀变形并强加于隧道上,致使盾构隧道管片以及纵、横向螺栓承受较大的内力与变形,从而危及盾构隧道的安全。《日本隧道标准规范(盾构篇)》也表明土性纵向不均匀分布对盾构隧道的抗震是极为不利的,如地质、覆盖层厚度、基岩深度等地基条件发生突变应特别注意盾构隧道的抗震问题<sup>[1]</sup>。目前对盾构隧道的抗震研究主要集中于平面问题的考虑<sup>[2-3]</sup>及土性均匀分布的三维分析<sup>[4-7]</sup>,而对土性纵向不均匀分布盾构隧道的抗震研究则很少,仅有少量关于地下管线的穿越不同土层的研究<sup>[8]</sup>和随机介质中隧道地震响应分析<sup>[9]</sup>。

随着国内地铁建设的飞速发展,盾构隧道将不可避免地穿越复杂地层,其地下结构属于隐蔽工程,一旦破坏不仅难以修复,而且损失惨重。我国《地铁设计规范》(GB50157-2003)<sup>[10]</sup>明确指出:地下结构在进行横断面方向的受力计算时,遇到下列情况还应对其进行纵向强度和变形的计算分析,包括:覆土荷载沿其纵向有较大变化时、地基或基础有显著差异时、地基沿纵向产生不均匀沉降时等。因此,研究土性不均匀分布对盾构隧道地震响应的影响规律,可为其合理设计提供参考。

## 1 计算模型与计算参数

为对比说明土参数纵向变化对隧道结构受力与变形的影响,拟建立两个模型:纵向均匀土体-隧道模型和纵向不均匀土体-隧道模型。其中,为降低其他因素的影响,在深度方向均假设为匀质的单层土体,即不考虑土体的分层效应以及土体沿深度的变化。而在纵向方向也仅考虑两种类型的土介质及隧道结构从相对较软的土层延伸至相对较硬的土层中。

本文仅考虑隧道半径为 3 m(即直径  $D$  为 6 m)的情形。根据文献<sup>[11]</sup>的研究成果,隧道左右两侧土体取  $5D$ (30 m),因而计算模型宽度取 90 m。由于仅进行水平横向抗震计算,纵向计算长度取 60 m,前面 30 m 是较硬的土层(剪切波速为 400 m/s),后面 30 m 是较软的土层(剪切波速为 200 m/s)。计算深度依据安评报告取 50 m。计算模型

如图 1 所示。

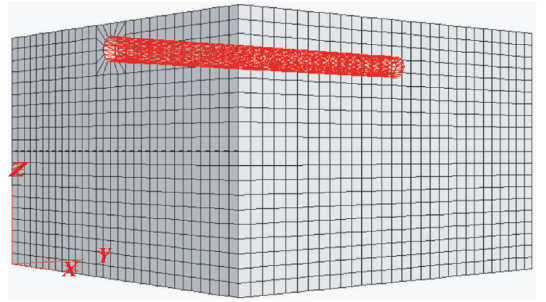


图 1 计算模型

Fig.1 Calculation model

在纵向前 45 m 的土体计算参数分别取为:剪切波速 200 m/s,泊松比 0.4,密度 1 800 kg/m<sup>3</sup>,后面 45 m 仅将土体剪切波速提高到 400 m/s,其余参数不变。隧道衬砌管片等价于匀质圆环,其弹性模量为 30 GPa,泊松比 0.2,质量密度 2 600 kg/m<sup>3</sup>。

由于当地抗震设防等级较低,地震动幅值仅 0.5g,因此隧道衬砌结构采用弹性模型,土体采用作者基于 FLAC3D 平台开发的非线性土体本构模型——Davidenkov 模型,其表达式为:

$$\frac{G_d}{G_{\max}} = 1 - \left[ \frac{\left(\frac{\gamma_d}{\gamma_r}\right)^{2B}}{1 + \left(\frac{\gamma_d}{\gamma_r}\right)^{2B}} \right]^A$$

$$\frac{\lambda}{\lambda_{\max}} = \left[ 1 - \frac{G_d}{G_{\max}} \right]^\beta$$

其中  $G_{\max}$  和  $\lambda_{\max}$  为最大动剪切模量和最大动阻尼比; $A$ 、 $B$ 、 $\beta$  和  $\gamma_r$  为回归参数,其中  $\gamma_r$  为参考应变。当  $A=1.0$ 、 $B=0.5$  时,Davidenkov 模型便退化为 Hardin-Drnevich 模型,因此,Davidenkov 模型的优点在于采用较多的拟合参数,具体参数见文献<sup>[12]</sup>。

输入地震波为该工程所在城市的人工合成波,幅值为 0.05g,其时程曲线及傅氏谱曲线如图 2 所示。本文仅进行水平横向抗震计算分析,也即图 1 中沿  $X$  向、在模型底部输入地震波。

## 2 计算结果

建立两个计算模型,进行三种工况的计算:(1)均匀土体模型,剪切波速为 200 m/s,记为 Uniform-soft;(2)均匀土体模型,剪切波速为 400 m/s,记为 Uniform-hard;(3)非均匀土体模型,记为 Non-uniform。

对于隧道等地下结构,结构的变形是关键性因素,因此需重点分析,特别是隧道拱顶、拱底的相对

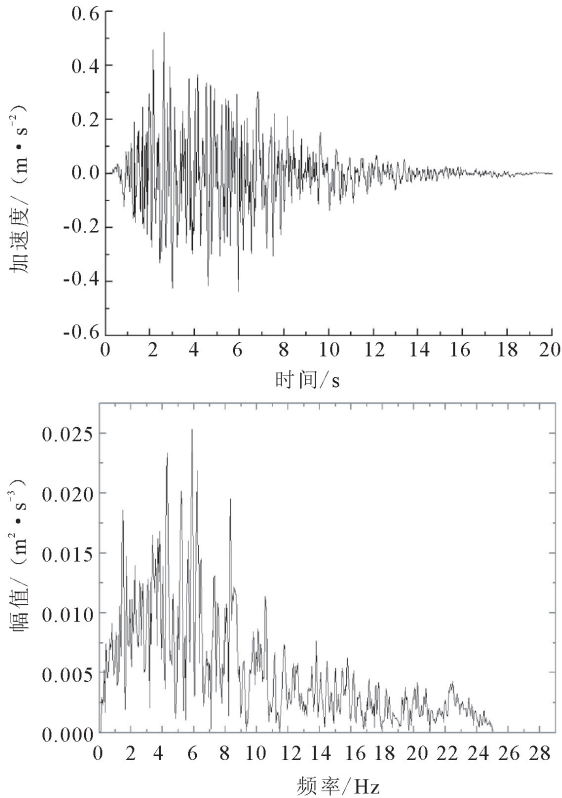


图 2 未来 50 年超越概率 10% 时地下 50 m 处人工合成波加速度时程及其频谱特征曲线图

Fig.2 Acceleration time-history and spectrum curves of artificial wave with 10% exceeding probability in future 50 years at the depth of 50 m

变形,同时也需分析结构受力的变化。

对于非均匀土体-隧道模型,在纵向( $y$ 向)正中截面(30 m 处)土性参数发生变化,将该截面定义为变化截面。本文着重分析该截面上隧道拱顶、拱底相对变形以及与该截面相接管片衬砌单元的内力。

### 2.1 隧道相对变形

图 3 为三种工况时变化截面上隧道拱顶与拱底水平相对位移时程曲线。由图可见:(1)两均匀工况下,隧道相对变形规律完全一致,由于输入的地震波幅值较小,土体非线性程度较弱,所以两工况下隧道相对变形十分接近;(2)土性不均匀时隧道相对变形比均匀时要大,而且出现的时刻、相位等均有变化;(3)从时程曲线来看,在地震结束时结构相对变形未归零,即表示仍有部分残余塑性变形。

### 2.2 隧道管片水平变形沿纵向变化

图 4 为三种工况时隧道拱底沿纵向各节点水平绝对位移变化曲线。由图可见:(1)对于匀质土体,在任一时刻同一深度的土体水平位移相同,强加给

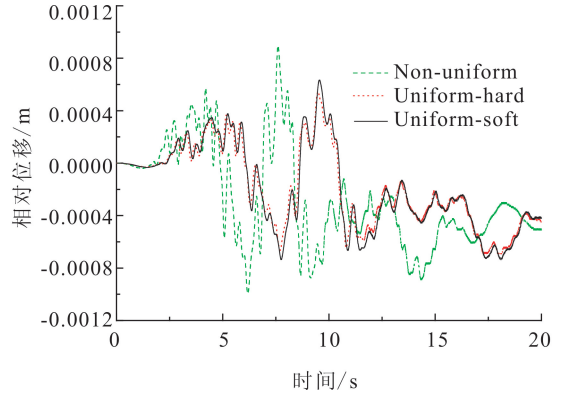


图 3 变化截面上拱顶与拱底水平相对位移时程曲线  
Fig.3 Time-history curves of horizontal relative displacement between tunnel vault and bottom at the changing section

结构的位移也相同,因而结构沿纵向各节点水平位移相同;(2)但对于非匀质土体,由于土体软弱程度的不同,对结构的束缚作用不同,隧道结构的变形将发生变化,这个变化不仅仅是在土性参数截面处发生突变,而是整个结构发生了水平偏移。由于本文考虑的土性参数仅在跨中截面处发生变化,实际中可能会存在相对复杂的变化情况,此时结构变形将更复杂。

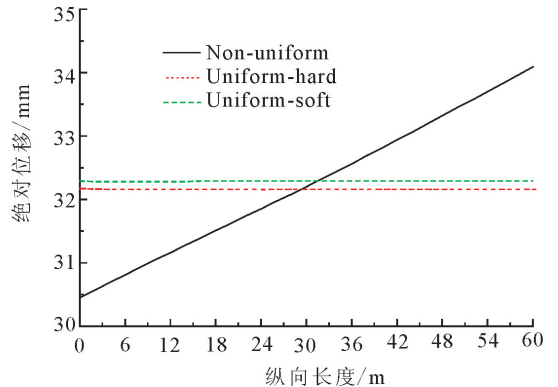


图 4 隧道拱底纵向各节点水平绝对位移变化曲线  
Fig.4 Horizontal absolute displacement curves of node at tunnel bottom along the longitudinal direction

### 2.3 隧道拱底管片受力分析

选取与纵向跨中变化截面相连的隧道拱底管片单元,三种工况时单元弯矩( $M_x$ )时程曲线如图 5 所示。由图可见:(1)土体较软时管片受力要大于土体较硬时;(2)不均匀土体时结构受力显著大于均匀时。

可见土体参数不均匀性对结构受力的影响不容忽视。

## 3 影响评价分析

我国目前还没有专门的、明确的地下结构抗震

性能评价方法,在《建筑抗震设计规范》(2010)中依据地面结构的规定,给出了地下框架结构的变形限值:地下钢筋混凝土框架结构在罕遇地震作用下弹性层间位移角的限值为 $1/250$ 。另外,我国《地铁设计规范》(GB50157-2003)根据实践经验,建议应控制衬砌环的直径变形在 $0.4\% \sim 0.6\% D$  ( $D$ 为隧道直径)之间。

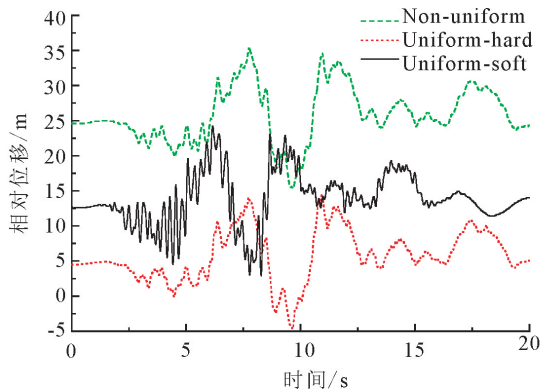


图5 三种工况隧道拱底纵向跨中节点弯矩时程曲线  
Fig.5 Bending moment time-history curves at mid-span of the tunnel bottom along the longitudinal direction for three cases

针对本文的计算结果,纵向土体不均匀时隧道的最大相对变形仅为 $0.001\text{ m}$ ,远小于最小限值( $0.048\text{ m}$ )。另外,隧道拱顶和拱底竖向位移在前文未给出,其相对变形值约为 $0.004\text{ m}$ ,也仅为上述最小限值的 $1/10$ 。

在受力方面,即使在土体不均匀情况下衬砌管片的最大弯矩也仅为 $40\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,不会影响结构安全。

由此可见,在简单工况下土性纵向不均匀对结构变形和受力有一定影响,但影响程度有限。

#### 4 结语

以某典型工程为例,建立匀质土体-隧道模型和土性参数沿纵向变化的土体-隧道模型,进行三种工况的初步计算分析。基于计算结果及对比分析,可得如下结论:

(1) 土性参数的变化对结构的变形和受力均有一定的影响;

(2) 以本文算例为例,该影响程度并不显著,原因可能是隧道结构的尺寸相对较小,土体条件相对较好(剪切波速分别为 $200\text{ m/s}$ 和 $400\text{ m/s}$ )以及输入地震动幅值相对较小。

但在实际工程中,大直径盾构隧道穿越土性参

数变化显著的软弱地层的案例极有可能出现。因此,土性参数变化对地下结构地震响应的影响应引起足够的重视。本文仅进行了初步计算分析,还应针对上述提到的三个方面因素进行广泛的参数分析,以期探讨更一般性的规律。

#### 参考文献(References)

- [1] 日本土木协会.日本隧道标准规范(盾构篇)及解释[M].朱伟,译.北京:中国建筑工业出版社,2001.  
Japan Society of Civil Engineers.Japanese Standard for Shield Tunneling[M].ZHU Wei, trans. Beijing: China Architecture and Building Press,2001. (in Chinese)
- [2] Kim D K, Yun C B. Earthquake Response Analysis in the Time Domain for 2D Soil-structure Systems Using Analytical Frequency-dependent Infinite Elements[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2003, 58(12): 1837-1855.
- [3] Nishiyama S, Muroya K, Haya H, et al. Seismic Design of Cut and Cover Tunnel Based on Damage Analyses and Experimental Studies[J]. Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan), 1999, 40(3): 158-164.
- [4] Stamos A A, Beskos D E. 3-D Seismic Response Analysis of Long Lined Tunnels in Half-space [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1996, 15(2): 111-118.
- [5] Arnau O, Molins C. Three-dimensional Structural Response of Segmental Tunnel Linings [J]. Engineering Structures, 2012, 44: 210-221.
- [6] 李钊. 地铁盾构隧道结构地震响应数值分析[D]. 天津: 天津大学, 2013.  
LI Zhao. Numerical Analysis of Seismic Response of Subway Shield Tunnel Structures [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese)
- [7] 杨宁波. 盾构隧道地震反应和影响因素分析[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013.  
YANG Ning-bo. Study on Seismic Response and Influencing Factors of Shield Tunnels [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese)
- [8] 梁建文. 穿越三种土介质管线的动力响应分析[J]. 天津大学学报, 1998, 31(2): 163-168.  
LIANG Jian-wen. Dynamic Analysis of Pipelines Laid Through Three Soil Media [J]. Journal of Tianjin University, 1998, 31(2): 163-168. (in Chinese)
- [9] Karakostas C Z, George D. Dynamic Response of Tunnels in Stochastic Soils by the Boundary Element Method [J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2002, 26(8): 667-680.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. GB50011-2010, Code for Seismic

Design of Buildings[S].Beijing:China Architecture and Building Press,2010.(in Chinese)

- [11] 楼梦麟,潘旦光,范立础.土层地震反应分析中侧向人工边界的影响[J].同济大学学报,2003,31(7):757-761.  
LOU Meng-lin,PAN Dan-guang,FAN Li-chu.Effect of Vertical Artificial Boundary on Seismic Response of Soil Layer[J].Journal of Tongji University,2003,31(7):757-761.(in

Chinese)

- [12] 王国波.软土地铁车站结构三维地震响应计算理论与方法的研究[D].上海:同济大学,2007.  
WANG Guo-bo.Study on Calculation Theory and Method of Three Dimensional Seismic Response of Subway Station Structures in Soft Soil[D].Shanghai:Tongji University,2007.(in Chinese)

\*\*\*\*\*  
(上接 822 页)

- [12] 罗爱忠,邵生俊,许萍.湿载条件下黄土结构性损伤演化特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(3):200-204.  
LUO Ai-zhong,SHAO Sheng-jun,XU Ping.Research on Structural Damage Development of Loess under Stress and Moisture[J].Journal of Northwest A & F University:Natural Science Edition,2012,40(3):200-204.(in Chinese)
- [13] 罗爱忠,邵生俊.湿载耦合作用下黄土结构性损伤演化及本构关系[J].岩石力学与工程学报,2012,31(4):841-847.  
LUO Ai-zhong,SHAO Sheng-jun.Structural Damage Evolu-

tion and Constitutive Relationship of Loess under Compling of Stress and Moisture[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2012,31(4):841-847.(in Chinese)

- [14] 罗爱忠.黄土的湿载结构性本构模型及其渐进破坏分析[D].西安:西安理工大学,2013.  
LUO Ai-zhong.Researching on Structural Constitutive Model and Analysizing of Progressive Faiure under Stress and Moisturing Conditions[D].Xi'an:Xi'an University of Tecnology,2013.(in Chinese)