

DOI: 10.11779/CJGE2023S20011

# 地面出入式盾构隧道动力响应试验对比分析

王 祺<sup>1</sup>, 袁 勇<sup>1,2</sup>, 禹海涛<sup>1,2</sup>, 刘 涛<sup>3</sup>

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;

3. 上海城投公路投资(集团)有限公司, 上海 200335)

**摘 要:** 地面出入式盾构隧道 (ground penetrating shield tunnel, GPST) 的地震动力响应与传统隧道有显著区别, 这是由于 GPST 部分衬砌出露地面, 部分埋置于地下, 其动力特性与一般隧道或地面建筑都有所不同, 采用振动台试验方法对 GPST 的地震动力响应进行分析。本研究建立了大型隧道-地层模型, 合理模拟了隧道的接缝、衬砌环横截面和纵向刚度, 并还原原型场地的动力参数。模型隧道的总长 7.7 m, 埋深范围为 $-0.5D \sim 0.5D$ , 其中  $D$  为隧道直径。试验中输入地震动为上海人工波, 输入方向垂直隧道轴线。试验对两种结构形式的隧道进行分析, 分别为标准衬砌环和顶部开洞衬砌环, 重点分析了隧道在地震中的加速度响应和直径变形响应, 以揭示 GPST 的动力响应特性。研究表明, 隧道埋深对隧道的地震响应产生显著影响。随着埋深减小, 隧道顶部加速度响应增大, 表现出了显著的摆动效应。随着埋深的增加, 隧道直径变形响应也相应增加, 但顶部开洞衬砌环在出由于刚度显著降低, 直径变形响应也出现极值。总的来说, 地下段 ( $D \geq 0$ ) 结构响应主要受控于土-结构相互作用 (SSI) 的影响, 而出露地面的隧道 ( $D < 0$ ) 由于没有地层的约束, 所以表现出明显的摆动效应。

**关键词:** 盾构隧道; 振动台试验; 地面出入; 动力响应; 浅埋隧道

中图分类号: TU91

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2023)S2-0013-06

**作者简介:** 王 祺(1995—), 男, 山西大同人, 博士研究生, 主要研究方向为地下结构地震动力响应。E-mail: yuany@tongji.edu.cn。

## Shaking table tests on ultra-shallowly embedded shield tunnels with ground-penetrating technology

WANG Qi<sup>1</sup>, YUAN Yong<sup>1,2</sup>, YU Haitao<sup>1,2</sup>, LIU Tao<sup>3</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction

in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Chengtou Highway Group Co., Ltd., Shanghai, 200335,

China)

**Abstract:** The dynamic response of the ultra-shallowly embedded tunnels, such as ground penetrating shield tunnels (GPSTs), is markedly different from that of the conventional one. Since GPST is partially exposed above the ground surface and partially submerged, it is crucial to investigate its seismic response. The preliminary results of a series of large-scale 1g shaking table tests, conducted at Tongji University, are discussed. A large-scale tunnel-soil model is developed to accurately reproduce the tunnel joints, the cross-sectional and longitudinal stiffness of the tunnel, and the key soil parameters of the prototype problem. The model tunnel has a total length of 7.7 m, with the embedded depth ranging from  $-0.5D$  to  $0.5D$ , where  $D$  is the tunnel diameter, while the negative values indicate that the tunnel crown is above the ground surface. The Shanghai artificial synthetic wave is applied as seismic excitation in the transverse direction. Two types of tunnels, standard lining and open-crown lining, are tested. The study focuses on analyzing the acceleration response and the ovaling deformation of the tunnel, to learn the dynamic characteristics of GPST. The results reveal a strong effect of embedment depth on tunnel seismic response. The decrease of embedded depth leads to a significant increase of accelerations. The tunnel exhibits a "whiplash effect", leading to strong shaking of the above-ground lining. The ovaling deformation increases with the embedded burial depth. Overall, the response of the underground lining ( $D \geq 0$ ) is governed by soil-structure interaction (SSI), whereas the above-ground structure ( $D < 0$ ) exhibits a pronounced whiplash effect due to the absence of soil confinement. Such effects need to be properly considered in the seismic design of GPST.

**Key words:** shield tunnel; shaking table test; ground penetrating; seismic response; shallowly embedded tunnel

基金项目: 上海市科学技术委员会课题 (22DZ1203005, 21DZ1202803)

收稿日期: 2023-11-30

\*通信作者 (E-mail: yuany@tongji.edu.cn)

## 0 引言

地面出入式盾构隧道 (GPST) 工法允许盾构机从地面或浅导坑始发或接收, 消除了传统盾构法隧道对深大工作井和较长的明挖法隧道的需求<sup>[1-3]</sup>。从而使盾构隧道的施工过程更加简化且对周围环境干扰较小。因此, GPST 工法不仅可以简化施工过程, 提高施工速度, 还可以减少隧道施工过程中对环境造成的不利影响, 减少施工过程中的碳排放。

目前关于 GPST 工法的研究主要集中在设计和计算方法<sup>[4]</sup>、施工过程盾构机姿态控制<sup>[5]</sup>、抗浮控制机制、衬砌稳定装置<sup>[6]</sup>以及静力响应<sup>[7]</sup>。然而, 目前仍缺乏针对 GPST 的抗震性能的相关研究, 本文旨在通过振动台试验研究 GPST 隧道的动力特性, 为其抗震计算和设计提供参考。

本文研究了两种类型的 GPST 在地震中的响应, 分别为: 标准完整衬砌, 和顶部开洞衬砌。顶部开洞衬砌可利用天然光照形成光过渡段, 减少能源损耗, 此方案已在相关设计文件中进行探讨, 但未对其地震响应进行研究。为此, 本研究团队设计并完成了一系列大比尺振动台试验。试验设计基于 Buckingham- $\pi$  定理<sup>[8-10]</sup>, 合理模拟原型分层场地土的动力特性<sup>[11-12]</sup>。并对模型隧道进行合理简化和缩尺设计, 使得模型隧道的横截面法向、切向刚度和纵向刚度与满足相似比设计要求。本文重点探讨两类隧道衬砌的加速度响应和横截面斜 45° 方向直径变形响应。

## 1 试验设计

### 1.1 试验设备

本次试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室多功能振动台系统进行。用于此次试验的矩形振动台长 10.0 m, 宽 6.0 m。该振动台具有 3 个自由度, 能够在横向、纵向和水平旋转方向进行激振。振动台的工作频率为 0.1~50 Hz, 峰值输入加速度为 1.5g, 最大载荷为 140 t。为模拟软土地场的自由场响应, 采用了一个长 9.5 m、宽 5.5 m、高 2.1 m 的层状剪切箱, 见图 1。剪切箱由 15 层钢框架组合而成, 层间通过滑动元件相连, 允许在地震动输入方向水平自由移动, 进而还原软土地场的自由场响应。

### 1.2 相似比设计

选定长度、弹性模量和密度相似比作为基本相似比, 在确定基本相似比的基础上, 可进一步推导其他物理指标的相似比。基本相似比的设计不仅需要考虑到 1g 振动台试验中重力相似比为 1.0 的限制, 还受到其他约束条件的影响, 如振动台载荷能力、模型隧道的加工精度、模型隧道材料的物理力学性能, 以及模型

土的密度和弹性模量范围。

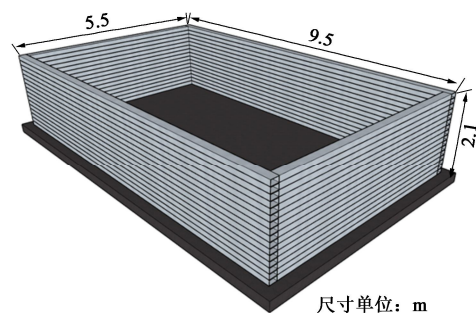


图 1 剪切箱示意图

Fig. 1 Laminar box used for shaking table tests

考虑到模型箱长边尺寸和模型隧道的埋深和坡度, 模型试验的长度相似比设定为 1/22.5, 从而使模型隧道总长为 7.7 m, 满足模型箱的边界条件。同样地, 根据模型材料的密度, 密度相似比设定为 1/2。最后在 1g 振动台试验加速度相似比 1.0 和模型材料选择限制下, 弹性模量的相似比设计值为 1/45。在此基础上, 基于量纲分析法, 可导出其他物理量的相似关系如表 1。

表 1 相似比设计

Table 1 Design of scaling factors

物理量	量纲分析	相似比
长度	$S_l$	1/22.5
密度	$S_\rho$	1/2
动剪切模量	$S_G$	1/45
弹性模量	$S_E = S_G$	1/45
加速度	$S_a = S_G S_\rho^{-1} S_l^{-1}$	1/1
时间	$S_t = S_l S_G^{-0.5} S_\rho^{0.5}$	1/4.74
频率	$S_f = S_l^{-1} S_G^{0.5} S_\rho^{-0.5}$	4.74/1

### 1.3 模型设计

模型设计分为两个部分, 分别为地层和隧道的模型设计。试验原型场地为上海软土地场, 模拟的原型场地深度为 45 m。因原型土无法满足密度、弹性模量等缩尺要求, 在试验中采用重塑土模拟原型场地。模型土由锯末和砂混合而成<sup>[9]</sup>, 通过改变锯末和砂的比例以及模型土的相对密实度, 可以改变其动力特性。在本研究中, 模型土按锯末与砂的质量比 1:2.5 混合。当模型土相对密度达到 90% 时, 模型土的密度为 860 kg/m<sup>3</sup>, 满足密度相似比 1/2 的要求。

下面对模型土的动力特性相似进行说明。首先对模型土进行共振柱试验, 根据试验结果<sup>[9]</sup>, 得到模型土在不同围压下的初始剪切模量。砂土等效剪切模量的拟合公式<sup>[10]</sup>如下:

$$G_{\max} = f(n) \bar{\sigma}_0^m \quad (1)$$

式中:  $G_{\max}$  为最大动剪切模量;  $\bar{\sigma}_0$  为平均围压;  $f(n)$

和  $m$  为拟合系数。

根据式(1)可以得到地层在不同围压下的最大剪切模量。将模型土的剪切模量按相似比转换为原型土的最大动剪切模量, 模型和原型的剪切模量曲线如图 2 所示。从图 2 中可得, 模型土在不同深度的剪切模量与原型土在  $1/45$  的剪切模量相似比下吻合较好。

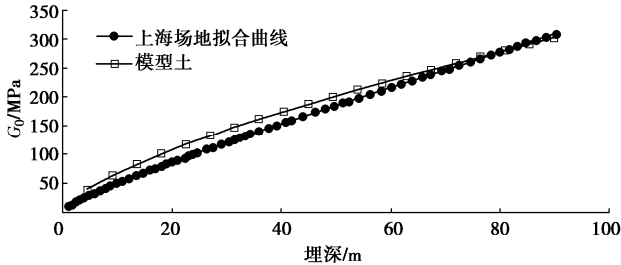


图 2 模型土和原型场地剪切模量对比

Fig. 2 Shear moduli of model soil and prototype

模型隧道的衬砌外径为 520 mm, 衬砌壁厚为 22 mm, 环宽为 70 mm。为了满足密度和弹性模量的相似比, 衬砌材料选用石膏<sup>[13]</sup>, 纵向接缝使用硅橡胶模拟, 环向接缝采用发泡硅胶条模拟, 使用碳素钢丝模拟环向螺栓, 通过施加预紧力的纵向钢绞线模拟纵向预应力螺栓连接, 如图 3 所示。

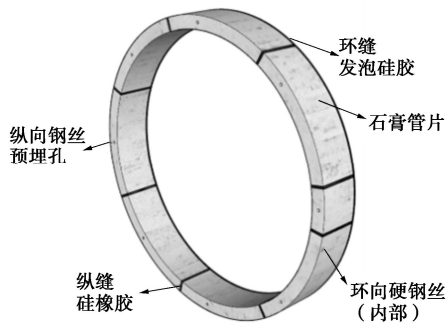


图 3 模型衬砌环

Fig. 3 Segmental linings of model tunnel

装配完成的标准隧道如图 4 所示。隧道的埋深范围为  $-0.5D \sim 0.5D$ , 其中  $D$  隧道直径, 埋深为负值表示隧道顶部露出地面。试验中两条隧道平行布置, 其中一条隧道为采用减震措施的隧道 (本文未讨论)。

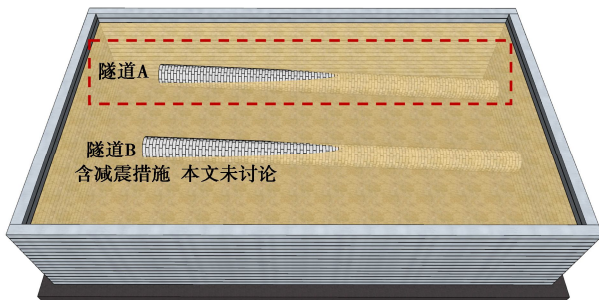


图 4 标准隧道拼装示意图

Fig. 4 Assembled model tunnel

顶部开洞模型隧道的布局如图 5 所示。



图 5 顶部开洞隧道拼装示意图

Fig. 5 Assembled model tunnel (with opened crown)

图 6 为试验中的 7 个监测断面, 对应的埋深分别为  $-0.5D$ ,  $-0.375D$ ,  $-0.25D$ ,  $-0.125D$ ,  $0D$ ,  $0.25D$ ,  $0.5D$ 。本文分析了以上 7 个关键断面的隧道顶部加速度响应和衬砌直径变形响应。

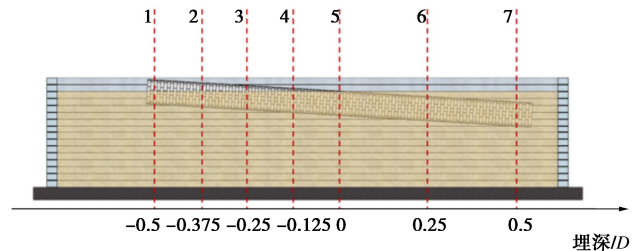


图 6 试验监测断面

Fig. 6 Model instrumentation sections

## 2 地震响应

### 2.1 地震动时程

输入地震动选用峰值为  $0.07g$  的上海人工波, 其加速度时程及傅里叶频谱见图 7。本文研究隧道横向的地震动响应, 输入地震动方向与隧道轴线方向垂直。

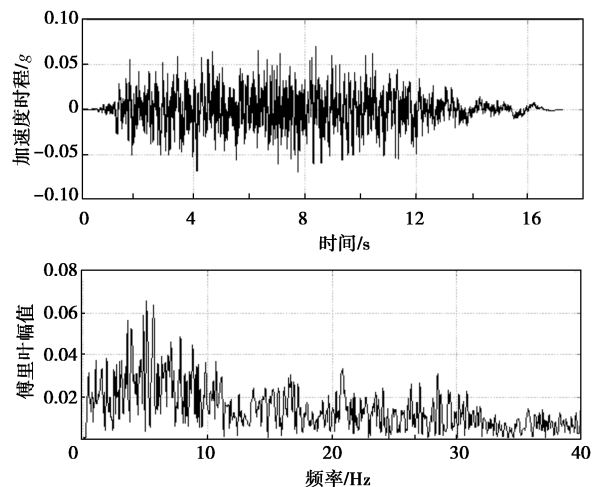


图 7 上海人工波时程和频谱

Fig. 7 Time histories and Fourier amplitudes of Shanghai artificial synthetic wave



## 2.2 隧道加速度响应

图 8,9 展示了标准衬砌隧道顶部的加速度时程响应。图 8 为加速度时程响应；图 9 为傅里叶频谱，水平坐标分别为频率和隧道埋深，竖坐标轴为傅里叶幅值。图 10, 11 为顶部开洞衬砌的地震响应。

试验结果表明，在标准衬砌环中，随着隧道埋深减小，隧道顶部的加速度响应峰值显著提高。与输入地震动峰值相比，隧道顶部的最大加速度响应峰值为  $0.21g$ ，为输入地震动的 3.0 倍，表现出显著的加速度放大效应。

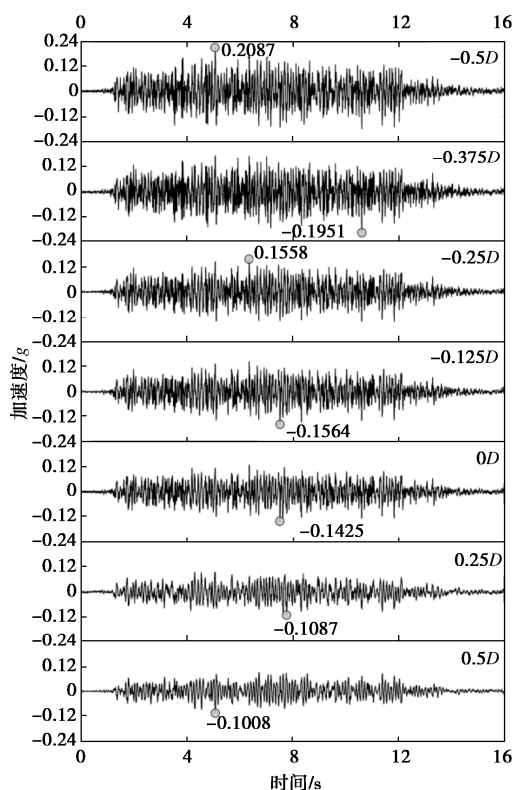


图 8 标准衬砌顶部加速度时程响应

Fig. 8 Time histories of acceleration of standard linings

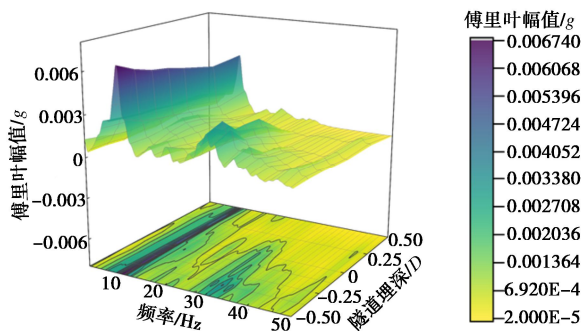


图 9 标准衬砌加速度傅里叶频谱

Fig. 9 Fourier spectra of acceleration of standard linings

在频谱响应方面，隧道加速度响应主要集中在 8.8 Hz 附近。在地上部分（埋深为负），隧道在约 30 Hz

处显示出较显著的二阶响应。此频率的峰值强度约为主频的 50%。自由场分析结果表明，8.8 Hz 是模型土的卓越周期。

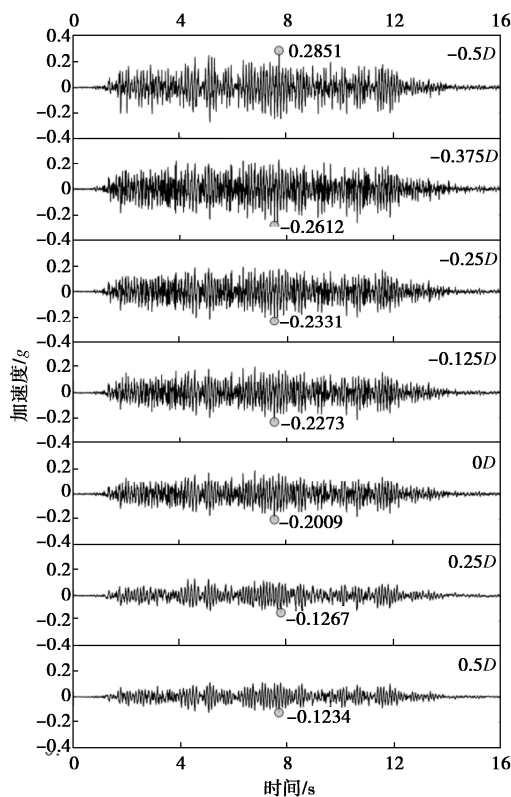


图 10 顶部开洞衬砌加速度时程响应

Fig. 10 Time histories of acceleration of open-crown linings

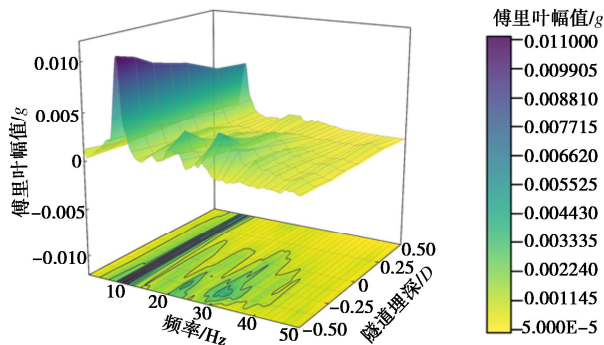


图 11 顶部开洞衬砌加速度傅里叶频谱

Fig. 11 Fourier spectra of acceleration of open-crown linings

图 10, 11 展示了顶部开洞的隧道段的加速度响应。与标准隧道衬砌相比，顶部开洞衬砌隧道在地上部分的加速度响应增加了约 40%。随着埋深的减小，结构的峰值加速度显著增加。与地震输入相比，结构加速度的最大放大系数达到输入地震动的 4.1 倍。

总体来说，对于标准衬砌和顶部开洞衬砌段，随着埋深的减小，隧道顶部的加速度响应增加。此外，地上段的顶部开洞隧道段的加速度响应约为标准衬砌的 140%。

### 2.3 直径变形响应

图 12~15 展示了标准和顶部开洞隧道衬砌的 45° 椭圆变形直径响应。在标准衬砌的情况下 (图 12, 13), 试验结果表明, 随着埋深的增加, 直径变形也随之增加。这与自由场响应分析一致, 自由场分析结果表明, 地表附近加速度为极大值, 但地表的剪应变变为 0, 地表附近的自由场剪应变较小。隧道椭圆直径变形直接受到地层剪应变的影响, 因此在试验场地范围内, 其随埋深不断增加。

在响应频谱方面, 两种隧道衬砌的峰值响应频率均为 8.9 Hz, 与自由场的主频接近。这进一步表明隧道的椭圆变形受到地层中的剪应变 (自由场响应) 的控制。

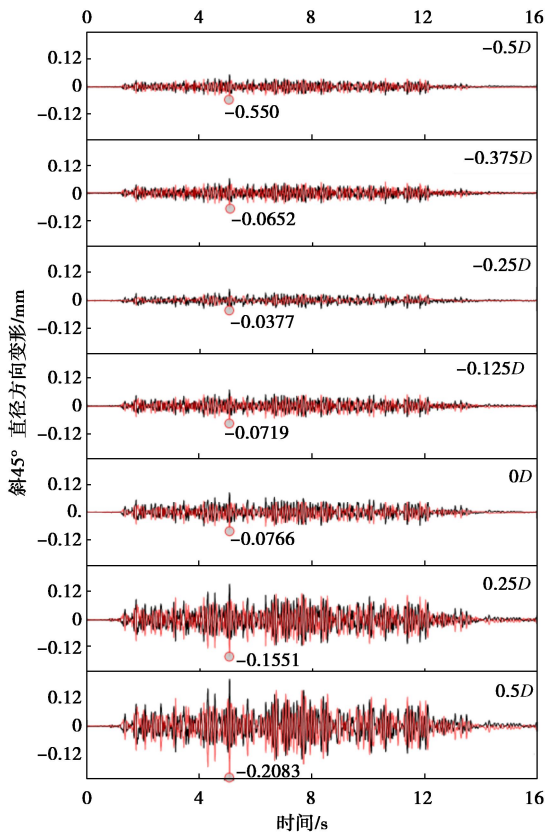


图 12 标准隧道衬砌的椭圆变形

Fig. 12 Ovaling deformations of standard tunnel linings

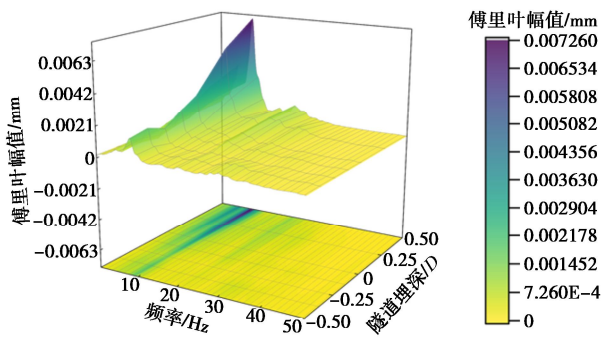


图 13 标准衬砌的变形傅里叶频谱

Fig. 13 Fourier spectra of deformation of standard linings

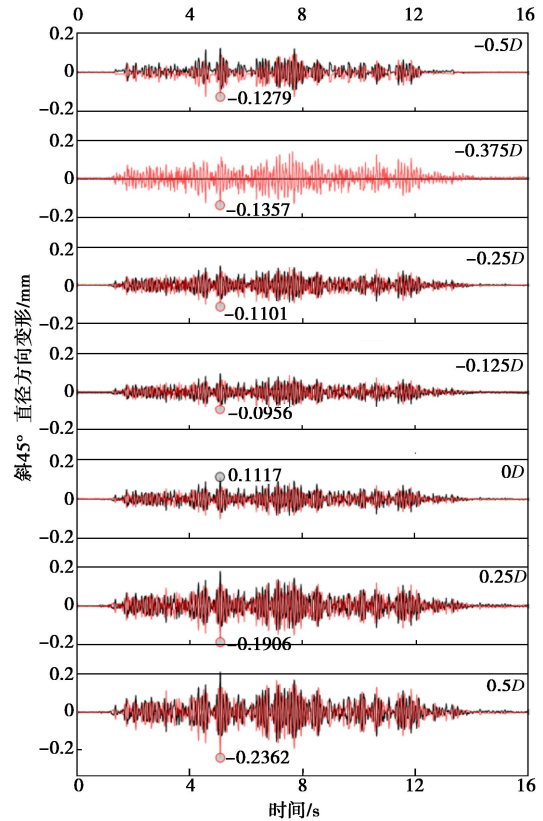


图 14 顶部开洞衬砌的椭圆变形

Fig. 14 Ovaling deformations of open-crown linings

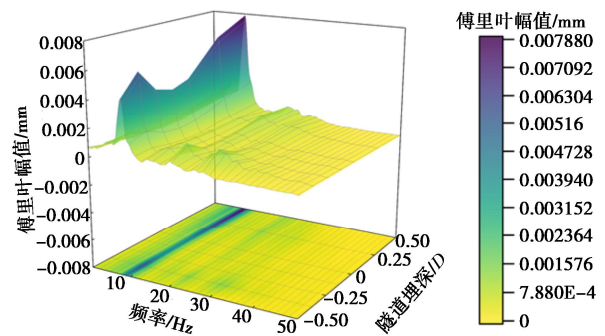


图 15 顶部开洞衬砌的变形傅里叶频谱

Fig. 15 Fourier spectra of deformation of open-crown linings

图 14, 15 展示了顶部开洞隧道衬砌的椭圆直径变形。与标准衬砌相似的是, 随着埋深的增加, 直径变形也随之增加。但在  $-0.5D \sim -0.375D$  的深度出现了直径变形的第二个峰值。这归因于隧道顶部开口导致的衬砌刚度显著降低, 从而增加了椭圆变形。

## 3 结 语

本文探讨了两种类型的地面出入式盾构隧道 (GPSTs) 在横向地震激励下的地震响应。主要结论如下:

隧道的地震响应受埋深的影响显著。具体来说,

埋深的减小导致衬砌加速度响应显著增加,地上部分隧道加速度响应较大,这是由于出地面段隧道失去了土体约束,响应一定程度上受结构的自振特性控制,在地震动激励作用下呈现明显的摆动效应。值得注意的是,顶部开洞隧道的加速度响应比标准隧道高出40%。

地下段衬砌( $D \geq 0$ )的响应受到地层-结构相互作用(SSI)约束,根据土体自由场响应理论,地表位置处剪应变响应为极小值,加速度响应为极大值,因此随着埋深增大,隧道直径变形响应逐渐增大,而加速度响应逐渐减小。地上结构( $D < 0$ )由于缺乏地层约束而呈现出明显的摆动效应,但标准隧道环不发生明显的相对变形,即地上段结构直径变形响应不显著。顶部开洞衬砌的隧道在 $D < 0$ 时椭圆变形显著提高,这是由于地上段隧道缺乏地层约束和衬砌刚度显著减小所致。

#### 参考文献:

- [1] DING W, JIN Y, ZHAO W, et al. Computational method for ground penetrating shield tunnel[J]. Tunnelling and Underground Construction, 2014: 227-236.
- [2] HITONARI F, TETSUYA N, MASAYOSHI I. URUP (ultra-rapid under pass) method—the first shield tunneling method for launching and arrival at the ground level[C]// World Tunneling Congress, Budapest, 2009.
- [3] NAKAMURA T, HAZAMA H. URUP (Ultra Rapid under Pass) method the first implementation in a public project[C]// 5th Civil Engineering Conference in the Asian Region and Australasian Structural Engineering Conference, Sydney, 2010.
- [4] OLDENHAVE A H. Starting a large diameter TBM from Surface: Feasibility Study for the Netherlands[D]. Delft: Delft University of Technology, 2014.
- [5] LU H H, ZHUO F C, BAI Y, et al. Research on key techniques of shield construction in mixed ground[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(513-517): 3482-3488.
- [6] 张子新, 胡文, 刘超, 等. 地面出入式盾构法隧道新技术大型模型试验与工程应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, **32**(11): 2161-2169. (ZHANG Zixin, HU Wen, LIU Chao, et al. Investigation of ground pass shield tunnelling method based on large-scale model test and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, **32**(11): 2161-2169. (in Chinese))
- [7] LIU C, LI J, ZHANG Z, et al. Model tests on tail-grouting process during URUP shield tunneling in soft soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **103**: 103451.
- [8] ZHANG S H, YUAN Y, LI C, et al. Effects of interior structure as double deck lanes on seismic performance of segmental linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **103**: 103411.
- [9] ZHANG J H, YUAN Y, BAO Z, et al. Shaking table tests on the intersection of cross passage and twin tunnels[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, **124**: 136-150.
- [10] LI S, YUAN Y, YU H, et al. Shaking table test on a segmental tunnel crossing soil-rock interface under transverse sinusoidal excitations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, **140**: 105325.
- [11] WU W F, GE S P, YUAN Y, et al. Seismic response of a cross interchange metro station in soft soil: physical and numerical modeling[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2021, **50**: 2294-2313.
- [12] ISHIBASHI I, ZHANG X. Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay[J]. Soils and foundations, 1993, **33**: 182-191.
- [13] ANTONIOU M, NIKITAS N, ANASTASOPOULOS I, et al. Scaling laws for shaking table testing of reinforced concrete tunnels accounting for post-cracking lining response[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **101**: 103353.

(编校: 黄贤沙)