

横向激励下隧道-竖井节点地震响应研究

张敬华^{1,2}, 袁 勇², 孙 清¹, 曲雅菲³

(1. 西安交通大学 土木工程系, 陕西 西安 710049; 2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;
3. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 隧道-竖井节点是地下空间网络的重要节点, 也是其抗震薄弱环节。由结构突变造成的土-结构动力相互作用不均匀会导致隧道与竖井产生显著的差动响应。本文依托典型软土道路隧道工程, 以隧道-竖井节点为试验对象, 依据动力相似原理完成了以土-结构相对刚度为控制因素的模型设计, 并开展了横向激励下隧道-竖井节点振动台模型试验。试验中测量了结构加速度响应和结构变形两类数据。通过对比加速度峰值和相关系数, 对隧道与竖井间的地震差动响应进行了定量描述, 并分析了由此引发的隧道纵向变形模式。在此基础上, 基于梁-弹簧模型, 提出了隧道-竖井节点地震响应拟静力简化分析模型, 并推导了隧道变形的拟静力解析计算方法。经振动台试验结果验证, 该拟静力简化分析模型可较好地预测隧道纵向变形, 并以闭式解的形式, 直接建立了隧道纵向变形与隧道-竖井相对位移的定量关系。

关键词: 隧道; 竖井; 地震响应; 振动台试验; 拟静力模型

中图分类号: TU93

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)02-0174-06

Seismic responses of tunnel-shaft junction under transverse excitations

ZHANG Jinghua^{1,2}, YUAN Yong², SUN Qing¹, QU Yafei³

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Tunnel-shaft junction is an integral part of the underground network. It is also among the underground structures most vulnerable to seismic impacts. The non-uniform soil-structure interactions stemming from the abrupt structural change are likely to cause discrepant responses between the shaft and the tunnel. Based on the engineering background of a typical highway tunnel in soft soil, a shaking tablet test was conducted on the shaft-tunnel junction. Following the dynamic similitude principles, the soil-structure relative stiffness was chosen as the controlling factor in the design of the model system. During the test, the shaft-tunnel junction was subject to transverse excitations, and accelerations and deformations of the model were recorded. The discrepant responses between the shaft and the tunnel were quantified through comparisons of their acceleration responses. The longitudinal deformation mode of the tunnel was thus analyzed. Hence, based on the beam-spring model, a pseudo-static model was proposed for the shaft-tunnel junction, and a pseudo-static analytical solution was therefore derived. As validated by the test results, the proposed pseudo-static model could predict longitudinal deformations of the tunnel under transverse excitations with reasonable accuracy. Moreover, it directly established a quantified relation between the longitudinal deformation of the tunnel and the tunnel-shaft relative displacement.

Key words: tunnel; shaft; seismic responses, shaking table test; pseudo-static model

隧道由于其特殊的施工、通风、紧急避险等需求, 沿线通常分布有非标准断面的特殊节点结构。其中, 隧道-竖井节点是常见的隧道变刚度节

点之一。隧道本身是一种细长均匀的构造物, 但与其与竖井相连引起的结构刚度突变, 会造成局部土-结构动力相互作用不均匀。即使在均一场地和

收稿日期: 2022-07-11

修改稿日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108383); 中国博士后科学基金面上资助项目(2021M702626); 土木工程防灾国家重点实验室开放基金资助(SLDRCE21-02); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(xzy012022075)

第一作者: 张敬华(1993—), 男, 助理教授, 主要从事地下结构地震动力问题研究。E-mail: zhang.j@xjtu.edu.cn

通信作者: 袁 勇(1963—), 男, 教授, 主要从事地下结构相关研究。E-mail: yuany@tongji.edu.cn

一致地震激励环境中, 隧道-竖井节点仍会产生显著的差动响应, 进而引发地震破坏^[1-2]。然而, 现有地下结构抗震研究仍主要以隧道横断面^[3-4]、隧道纵向^[5-6]、车站标准断面^[7-8]、独立车站^[9]等单体地下结构为对象。相比之下, 针对隧道-竖井节点的抗震研究仍较少。

本文以上海沿江通道工程大直径盾构隧道为背景, 对隧道-竖井节点地震响应进行研究。依据动力相似原理, 以土-结构相对刚度为控制因素, 完成了隧道-竖井节点振动台模型试验方案设计。模型缩尺比例 1:60; 模型土采用锯末和干砂按 1:2.5 质量比配置而成的人工土; 隧道模型由聚乙烯衬砌环拼装而成; 竖井模型为 3D 打印尼龙材质。试验过程中, 沿隧道横向施加水平地震激励, 并测量模型系统的加速度和变形。其中加速度数据用于描述隧道与竖井的差动响应, 变形数据用于分析横向激励下节点的变形模式。基于试验数据, 结合梁-弹簧模型, 提出了隧道-竖井节点地震响应拟静力简化分析模型, 并推导了隧道变形的拟静力解析计算方法。经振动台试验验证, 该拟静力简化分析模型可较好地预测隧道纵向变形, 并以闭式解的形式, 直接建立了隧道纵向变形与隧道-竖井相对位移的定量关系。

1 隧道-竖井节点振动台模型试验

1.1 试验方案

本试验利用同济大学地震工程馆多功能振动台系统, 台面长 10 m, 宽 6 m, 额定输出加速度 1.5 g, 额定荷载 140 t。工程原型盾构隧道外径 15 m。考虑试验中隧道模型与模型箱侧壁应留出大于 10 倍隧道直径的宽度以消除边界效应, 可初步选定试验缩尺比例为 1:60。试验中拟采用上海人工波为地震激励信号, 考虑台面额定输出加速度限制, 可初步选定惯性加速度相似比为 4:1。

隧道地震动力响应主要受土-结构动力相互作用控制^[10]。因此, 模型场地的动力特性相似, 是试验方案设计的首要内容。已知连续固体动力运动方程如下^[11]。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda_L + G) \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + G \nabla^2 u \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; u 为位移; t 为时间; λ_L 为 Lamé 常数; G 为剪切模量; ϵ 为应变; x 为位置坐标。由此, 可选定密度 ρ , 位移 u , 剪切模量 G 为模型场地相似基本变量, 并由量纲分析可得如下相似关系为

$$S_G / (S_l \cdot S_\rho) = S_a \quad (2)$$

在几何相似比 S_l 和惯性加速度相似比 S_a 已选定的前提下, 剪切模量相似比 S_G 和密度相似比 S_ρ 符合上述方程的材料可用于制作本试验中的模型场地。已知工程原场地等效均一重度为 19.1 kN/m³, 等效最大动剪切模量为 116 MPa。因此, 可选用锯末和干砂按 1:2.5 质量比配置而成的人工土模拟隧道原场地^[12]。由此可得本试验相似关系如表 1 所示。

表 1 模型相似关系

Tab. 1 Similitude relations of the model.

物理量	符号	相似关系	相似比
长度	l	S_l	1 / 60
密度	ρ	S_ρ	0.38
加速度	a	S_a	4
剪切模量	G	$S_G = S_a S_l S_\rho$	0.024 8

地下结构抗震分析的特点在于其地震响应主要受土-结构动力相互作用的控制^[10], 其中土-结构相对刚度比为隧道地震响应的关键控制变量^[13-14]。因此, 本试验选取土-结构相对刚度为控制指标进行隧道模型的设计, 即原状土和原型结构的土-结构相对刚度比与模型土和模型结构的土-结构相对刚度比保持一致, 可使模型系统与结构原型的土-结构动力相互作用尽可能一致。圆截面隧道的土-结构相对弯曲刚度比如下^[10]。

$$F = \frac{E_s (1 - \mu_T^2) R^3}{6 E_T I_L (1 + \mu_s)} \quad (3)$$

式中: F 为隧道横断面土-结构相对弯曲刚度比; E_s 为土体弹性模量; μ_T 为隧道泊松比; R 为隧道半径; E_T 为隧道弹性模量; I_L 为单位长度隧道横断面相对隧道轴线的惯性矩; μ_s 为土体泊松比。由方程(3)可得隧道模型相似比控制方程为

$$S_F = \frac{S_{E_s} S_R^3 (1 - \mu_{Tm}^2) (1 + \mu_{sp})}{S_{E_T} S_{I_L} (1 - \mu_{Tp}^2) (1 + \mu_{sm})} \quad (4)$$

式中: μ_{Tm} 为隧道模型泊松比; μ_{sp} 为原场地泊松比; μ_{Tp} 为原型隧道泊松比; μ_{sm} 为模型土泊松比。已知隧道原型采用 C60 混凝土浇筑, 弹性模量为 36 GPa, 泊松比为 0.167。原状土泊松比为 0.38, 模型土泊松比为 0.40。因此, 可选用聚乙烯材料制作隧道模型, 其弹性模量为 790 MPa, 泊松比为 0.41。又 $S_R = S_l = 1/60$, 可得 $S_F = 0.95$, 接近目标值 1。此外, 聚乙烯材料还有价格低廉, 易于高精度加工等优势。

为模拟盾构隧道管片拼装的效果, 本试验隧道模型由独立衬砌环模型拼装而成。如图 1 所示, 每个衬砌环宽 30 mm, 外径 250 mm, 厚 11 mm。

衬砌环间通过纵向连接键互相咬合,以此模拟环缝和纵向螺栓连接.在原隧道纵缝位置处,设置纵向削减槽,以此模拟纵缝和环向螺栓连接.为精确还原竖井内部构造,采用3D打印快速成型技术,按1/60缩尺比例制作竖井模型,如图2所示.

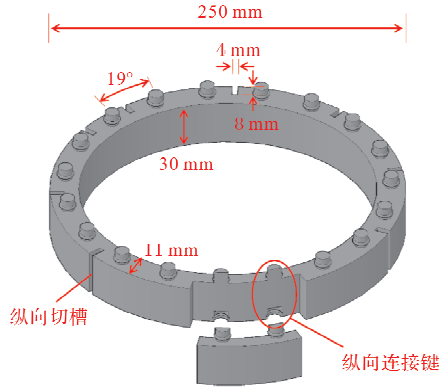


图1 衬砌环模型

Fig. 1 Lining ring model

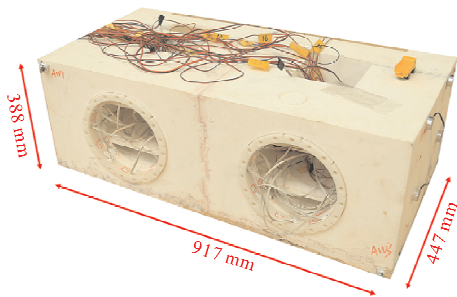


图2 竖井模型

Fig. 2 Shaft model

本试验采用刚性箱为模型容器.如图3所示,模型箱长10 m,宽4.5 m,高1.5 m.试验测量方案如图4所示,隧道模型A上设置A1~A6共6个加速度测点,竖井模型上设置AW加速度测点,均用于测量沿隧道横断面方向的加速度响应.隧道模型B上共设置9个环缝张开量测量面,即图4中JW和J1~J8.以上海人工波为台面输入激励,振动方向沿隧道横断面方向.工况M1中,台面峰值加速度0.3 g,50年超越概率10%.工况M2中,台面峰值加速度0.4 g,50年超越概率3%.加速度时程信号见图5.



图3 振动台试验

Fig. 3 Shaking table test

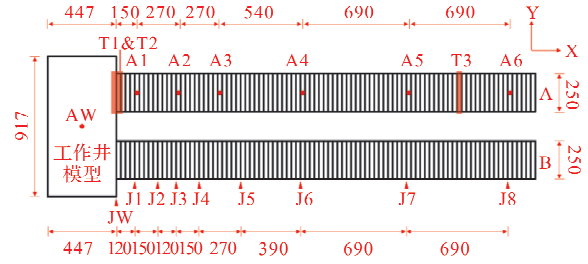


图4 测量方案

Fig. 4 Instrumentation

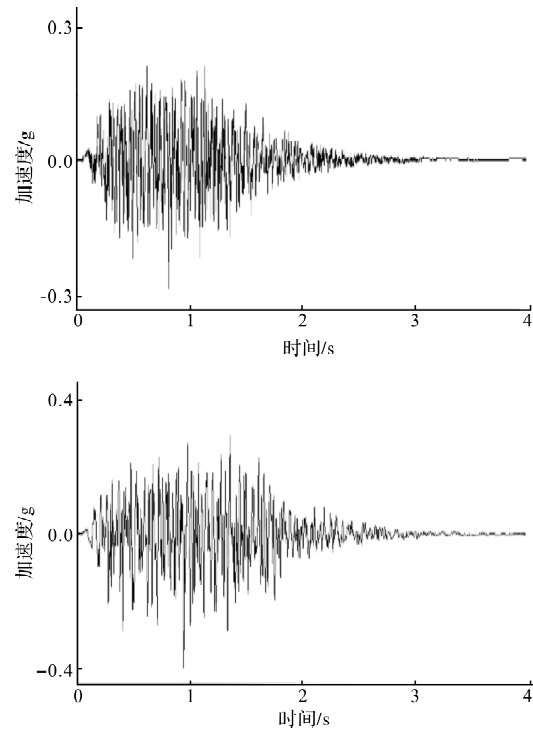


图5 加速度时程信号(上:工况M1;下:工况M2)

Fig. 5 Accelerograms (Up: Case M1; Down: Case M2)

1.2 试验结果及分析

分别提取两工况中各测点加速度响应峰值,如图6所示.竖井测点AW均记录到相应工况中加速度响应最大值,图中曲线从左到右沿远离竖井方向均逐渐减小.为了更准确地定量描述隧道和竖井间的差动响应,采用统计学方法,计算工况M1中不同测点加速度信号相关系数为

$$\rho_{nm} = \frac{\text{cov}(A_n, A_m)}{\sqrt{D(A_n)D(A_m)}} \quad (5)$$

式中: A_n 和 A_m 分别为 n 测点和 m 测点记录到的加速度时程信号; $\text{cov}(A_n, A_m)$ 为 A_n 和 A_m 的协方差; $D(A_n)$ 和 $D(A_m)$ 分别为 A_n 和 A_m 的方差; ρ_{nm} 为 A_n 和 A_m 的相关系数.采用以上公式算得相关系数矩阵如图7所示,矩阵中各元素对应各测点加速度信号相关系数.例如,矩阵中第一行第三列元素为AW测点和A2测点的加速度信号相关系数.相关系数取值范围为-1~+1,其中-1代表严格负线性相关,+1代表严格正线性相关,0

代表不相关. 由定义可知, 所有相关系数矩阵均为对称矩阵, 且对角线元素为 1.

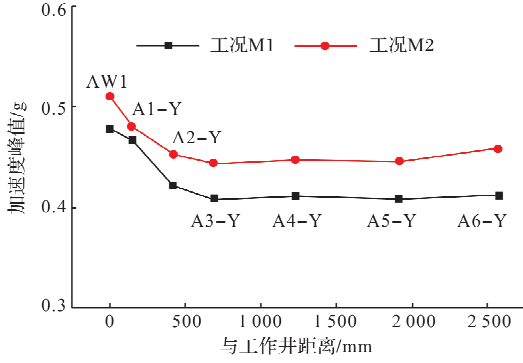


图 6 加速度响应峰值

Fig. 6 Peak acceleration responses

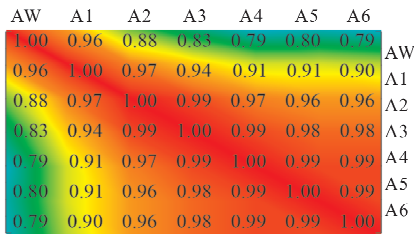


图 7 工况 M1 加速度信号相关系数

Fig. 7 Correlation coefficients of acceleration in Case M1

图 7 中, 所有相关系数均大于 0.79, 说明隧道-竖井整体响应相似. 其中最小元素为竖井测点 AW 和隧道测点 A6 间的加速度响应相关系数. 并且, 所有小于 0.90 的相关系数, 仅出现在矩阵的第 1 行 (列), 而隧道测点 A2~A6 间的相关系数均不小于 0.96. 由以上分析可知, 尽管隧道-竖井整体跟随地层运动, 但两者仍有明显的差动响应, 不仅加速度响应峰值有差异, 且加速度信号整体相关性较弱.

分别提取两工况中各环缝测量面记录到的峰值张开量, 如图 8 所示. 其中, 隧道与竖井对接环缝 JW 均记录到张开量最大值. 从 JW 到 J8, 沿远离竖井模型方向, 环缝张开量呈现明显的下降趋势. 与距离竖井模型最远的 J8 相比, M1 和 M2 工况中, JW 环缝张开量分别增加 642% 和 396%.

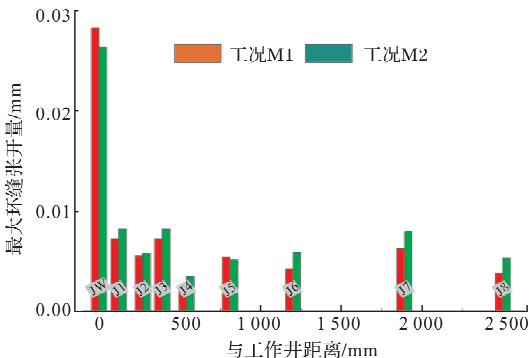


图 8 隧道环缝张开量

Fig. 8 Extension of the circumferential joints

2 隧道-竖井节点地震响应拟静力简化分析模型

隧道和竖井在横向地震激励下表现出明显的差动响应, 且隧道环缝张开量在靠近竖井处显著增加. 基于梁-弹簧模型, 当地震动沿隧道横向输入, 隧道-竖井节点拟静力简化分析模型如图 9 所示. 由于竖井刚度远大于隧道和地层, 可将其视为理想刚体. 隧道则简化为连续欧拉-伯努利梁, 其左端与竖井固接, 右端延伸至无限远, 其纵向弯曲刚度为 $(EI)_{eq}$. 地层简化为 Winkler 地基弹簧, 刚度为 $k_{y,T}$. 定义 $u_y(x, t)$ 为隧道 x 点在 t 时刻的横向位移. 定义 $s_T(t)$ 为地层位移. 定义 $u_T(t)$ 为竖井和地层在 t 时刻的相对位移. 假设隧道在无限远处与地层响应完全一致, 则有^[15-16],

$$(EI)_{eq} \frac{\partial^4 u_y(x, t)}{\partial x^4} + k_{y,T} u_y(x, t) = k_{y,T} s_T(t) \quad (6)$$

$$\begin{cases} \lim_{x \rightarrow +\infty} u_y(x, t) = s_T(t) \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\partial u_y(x, t)}{\partial x} = 0 \\ u_y(0, t) = s_T(t) + u_T(t) \\ \left. \frac{\partial u_y(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

求解上述微分方程可得横向地震激励下隧道位移为

$$u_y(x, t) = \sqrt{2} u_T(t) e^{-\frac{\beta_1}{\sqrt{2}} x} \sin\left(\frac{\beta_1}{\sqrt{2}} x + \frac{\pi}{4}\right) + s_T(t) \quad (8)$$

式中: $\beta_1 = \sqrt{k_{y,T}/(EI)_{eq}}$. 又欧拉-伯努利梁有如下挠度-弯矩关系, 即

$$\frac{\partial^2 u_y(x, t)}{\partial x^2} = -\frac{M_{zT}(x, t)}{(EI)_{eq}} \quad (9)$$

式中, $M_{zT}(x, t)$ 为隧道梁 x 点在 t 时刻的纵向弯矩. 针对本试验中的盾构隧道, 假设在 $x = x_j$ 处有环缝, 则该环缝两侧衬砌环相对转动位移为^[17],

$$\theta_T(x_j, t) = \frac{M_{zT}(x_j, t) l_s}{(EI)_{eq}} \quad (10)$$

式中, l_s 为环宽. 则 $x = x_j$ 处 t 时刻环缝张开量为

$$\delta_T(x_j, t) = \theta_T(x_j, t) (1 + \sin \varphi) R \quad (11)$$

将式(8)、(9)、(10)代入式(11)可得

$$\delta_T(x_j, t) = \sqrt{2} u_T(t) R (1 + \sin \varphi) \beta_1^2 l_s e^{-\frac{\beta_1}{\sqrt{2}} x_j} \cos\left(\frac{\beta_1}{\sqrt{2}} x_j + \frac{\pi}{4}\right) \quad (12)$$

式中, $u_T(t)$ 为竖井和地层 t 时刻相对位移. 由于隧道在无限远处与地层响应完全一致, $u_T(t)$ 也表

示竖井和隧道远端相对位移. 显然, 当 $u_T(t)$ 取最大值时, 环缝张开量 $\delta_T(x_j, t)$ 也取最大值. 定义 $u_{T, \max}$ 为横向地震激励下隧道-竖井相对位移最大值, 则环缝张开量最大值为

$$\delta_{T, \max}(x_j) = \sqrt{2} u_{T, \max} R (1 + \sin \varphi) \beta_1^2 l_s e^{-\frac{\beta_1}{\sqrt{2}} x_j} \cos\left(\frac{\beta_1}{\sqrt{2}} x_j + \frac{\pi}{4}\right) \quad (13)$$

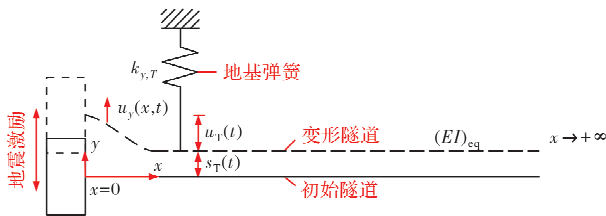


图9 横向地震激励下隧道-竖井节点拟静力简化分析模型

Fig. 9 Pseudo-static model of tunnel-shaft junction under transverse excitations

利用该方程可算得本试验 M1 和 M2 工况中隧道模型环缝张开量最大值, 如图 10 所示。

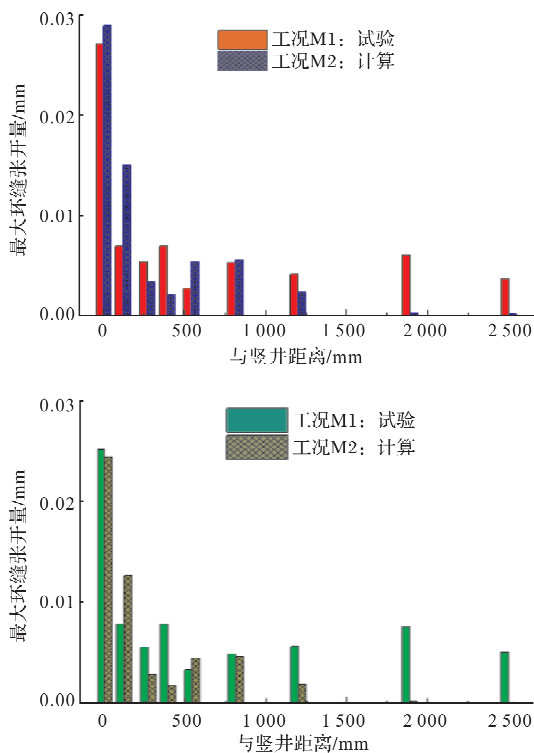


图10 隧道-竖井节点环缝张开量试验与计算结果对比

Fig. 10 Comparison between test and analytical results of the joint extensions of tunnel-shaft junction

图中拟静力模型计算结果与振动台试验测量结果吻合较好, 其中 JW 环缝张开量计算误差仅 7%。拟静力模型计算结果与试验结果相比, 误差主要表现在远离竖井的环缝张开量计算值偏小,

这是因为分析模型中假设隧道在无限远处与地层响应完全一致。当与竖井距离增大, 隧道纵向变形趋近于零, 环缝张开量也趋近于零。但振动台试验中, 隧道模型和地层模型显然不可能响应完全一致。因此图 10 中, 在远离竖井的部位, 环缝张开量计算结果相比试验结果偏小。

3 结语

以上海沿江通道工程大直径盾构隧道为背景, 针对隧道-竖井节点, 以土-结构相对刚度为控制因素, 完成了大型振动台模型试验方案设计, 并对隧道-竖井节点在横向激励下的地震响应进行了测试。通过加速度响应峰值和加速度信号相关系数, 定量描述了隧道与竖井的差动响应。结果显示, 两者的差动响应与隧道纵向变形密切相关。基于梁-弹簧模型, 提出了横向激励下隧道-竖井节点拟静力简化分析模型。模型计算结果与试验结果吻合较好, 直接建立了隧道纵向变形与隧道-竖井相对位移的定量关系。

参考文献 References

- [1] 王秀英, 刘维宁, 张弥. 地下结构震害类型及机理研究[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(11):55-58.
WANG Xiuying, LIU Weining, ZHANG Mi. Study on the categorization and mechanism of seismic damage of underground structures[J]. China Safety Science Journal, 2003, 13(11):55-58.
- [2] 小泉淳. 盾构隧道的抗震研究及算例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009:2-9.
KOIZUMI Atsushi. Seismic study and examples of shield tunnels[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009:2-9.
- [3] ZHANG Wengang, HAN Liang, FENG Li, et al. Study on seismic behaviors of a double box utility tunnel with joint connections using shaking table model tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 136:106118.
- [4] DING Xuanming, ZHANG Yanling, WU Qi, et al. Shaking table tests on the seismic responses of underground structures in coral sand[J]. Tunnelling and

- Underground Space Technology, 2021, 109:103775.
- [5] WANG Chenglong, DING Xuanming, CHEN Zhixiong, et al. Seismic response of utility tunnels subjected to different earthquake excitations[J]. Geomechanics and Engineering, 2021, 1(24):67-69.
- [6] HAN Liang, LIU Hanlong, ZHANG Wengang, et al. Seismic behaviors of utility tunnel-soil system: With and without joint connections [J]. Underground Space, 2022, 5(7):798-811.
- [7] ZUCCA Marco, VALENTE Marco. On the limitations of decoupled approach for the seismic behaviour evaluation of shallow multi-propped underground structures embedded in granular soils[J]. Engineering Structures, 2020, 211(5):110497.
- [8] LIU Hongtao, XU Chengshun, DU Xiuli. Seismic response analysis of assembled monolithic subway station in the transverse direction[J]. Engineering Structures, 2020, 219(9):110970.
- [9] NGUYEN Van-Quang, NIZAMANI Zubair, PARK Duhee, et al. Numerical simulation of damage evolution of Daikai station during the 1995 Kobe earthquake [J]. Engineering Structures, 2020, 206(3):110180.
- [10] HASHASH Youssef, HOOK Jeffrey, SCHMIDT Birger, et al. Seismic design and analysis of underground structures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(4):247-293.
- [11] KAUSEL Eduardo. Fundamental solutions in elastodynamics: a compendium[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [12] 燕晓, 袁聚云, 袁勇, 等. 大型振动台试验模型场地的配制方法 [J]. 结构工程师, 2015, 31(5): 116-120.
- YAN Xiao, YUAN Juyun, YUAN Yong, et al. Study on model soil of large-scale shaking table test [J]. Structural Engineers, 2015, 31(5):116-120.
- [13] LU Shasha, XU Hong, WANG Laigui, et al. Effect of flexibility ratio on seismic response of rectangular tunnels in sand: Experimental and numerical investigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2022, 157:107256.
- [14] SANDOVAL Eimar, BOBET Antonio. Effect of frequency and flexibility ratio on the seismic response of deep tunnels[J]. Underground Space, 2017, 2(2): 125-133.
- [15] YANG Yusheng, ZHANG Shaohua, ZHANG Jinghua, et al. Analytical solution for long tunnels in layered saturated poroelastic ground under inclined P1-SV waves[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 124:104458.
- [16] YU Haitao, ZHANG Zhengwei, CHEN Juntao, et al. Analytical solution for longitudinal seismic response of tunnel liners with sharp stiffness transition[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 77:103-114.
- [17] SHIBA Y, KAWASHIMA K, OBINATA N, et al. An evaluation method of longitudinal stiffness of shield tunnel linings for application to seismic response analyses[J]. Proceedings of Japan Society of Civil Engineering, 1988: 319-327.

(编辑 桂智刚)