

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201905019

## 双仓地下管廊抗震性能振动台试验研究\*

魏奇科<sup>1</sup>, 韩亮<sup>2</sup>, 王振强<sup>1</sup>, 冯立<sup>2</sup>, 陈志雄<sup>2</sup>

(1. 中冶建工集团有限公司, 重庆 400080; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:** 借助振动台试验系统, 应用El Centro原始地震波和不同频率正弦波开展了双仓地下综合管廊的相似模拟试验研究, 模型中地基土为标准砂。结果表明: 管廊侧壁最大动土压力响应沿深度呈倒立“W”形分布, 并且在振动过后, 管廊结构与周围土体之间的土压力场发生了改变; 管廊侧壁沿深度最大加速度响应呈减小趋势, 而随输入峰值加速度的增大而增大, 由加速度响应时程曲线对比来看, 管廊结构与其周边土体的运动模式基本一致; 地震过程中结构角部的拉应变响应比各侧边中点更加剧烈, 且随输入峰值加速度增大而增大; 在15 Hz正弦波作用下, 场地和管廊结构组成的体系地震响应最显著, 各测点之间的地震响应差异在此频率下也最为明显, 反映出振动波频率特性对地下结构地震响应的规律。

**关键词:** 双仓综合管廊; 振动台; 相似模拟; 地震响应; 频率特性

**中图分类号:** TU435   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1052-10

## Shaking Table Test Study on Seismic Performance of Double Box Underground Utility Tunnel

WEI Qike<sup>1</sup>, HAN Liang<sup>2</sup>, WANG Zhenqiang<sup>1</sup>, FENG Li<sup>2</sup>, CHEN Zhixiong<sup>2</sup>

(1. China Metallurgical Construction Engineering Group CO., LTD, Chongqing 400080, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** With the help of the shaking table test system, similarity model tests were conducted for a double box underground utility tunnel under the original El Centro earthquake spectrum and sine waves with different frequencies, and the standard sand in Fujian Province was used to simulate the foundation soil. It is concluded that the maximum dynamic earth pressure has a reverse W-shaped distribution, and the earth pressure field has changed after the earthquake. In general, the maximum acceleration response decreases with an increasing depth and increases with the input PGA. With the comparison of the acceleration response spectrum between the structure and the surrounding soil, the motion pattern is basically in agreement with each other. During the earthquake, the maximum tensile strain response occurs at corners of the structure, which becomes larger with the increase of the input PGA, whereas the tensile strain is rather small at the middle part of each sidewall. Besides, it is revealed that the seismic responses and the differences of seismic responses between different measuring becomes points are the most significant under the sinusoidal wave of 15 Hz, which reflects the influence of frequency characteristics of shaking waves on the seismic responses of underground structures.

**Keywords:** double box utility tunnel; shaking table; similarity modeling; seismic response; frequency characteristics

\* 收稿日期: 2019-05-09; 修回日期: 2019-08-28

基金项目: 重庆市社会事业与民生保障科技创新专项(cstc2017shmsA30028)资助

作者简介: 魏奇科(1984—), 男, 教授级高级工程师, 博士。主要从事建筑结构及施工技术。E-mail: 93427091@qq.com

## 引言

在当前城市建设中,由于地下综合管廊良好的集合功能,而且方便后期维护管理,地下综合管廊逐步被列入城市发展规划之中。与此同时,地下结构的抗震性能也越来越引起人们的注意,特别是自1995年阪神地震以后,国内外很多专家采用理论、试验以及数值分析验证等多种途径,在地下结构抗震方面做了大量研究工作<sup>[1-6]</sup>,包括结构-土-结构相互作用机制<sup>[7]</sup>、地下结构抗震试验方法<sup>[3]</sup>以及数值模拟<sup>[8]</sup>等。

部分学者从运用相关理论对地下结构的抗震性能进行了分析,比如 Stamos 和 Bekos 于1996年利用坐标变换降维进行了三维地震响应研究<sup>[5]</sup>,日本学者 Tateishi 于1995~2005年利用静态有限元法,基于已有的方法,提出了 GRM 法和修正的 FS-DM 法<sup>[6]</sup>。随着试验设备的发展,苗雨<sup>[1]</sup>、Yan Kong-ming<sup>[9]</sup>以及 Singh<sup>[10]</sup>等在内很多研究人员利用振动台系统开展地震动研究,少数学者使用离心机开展在地震下的土-基础-地表结构相互作用特征<sup>[11]</sup>,也有学者单从数值角度来进行研究<sup>[12]</sup>,将数值技术与试验结合起来探讨地下结构的地震响应特征也是当前进行地下结构抗震研究的一个热点<sup>[13]</sup>,同济大学李杰团队从振动台试验方法<sup>[4]</sup>、试验结果分析<sup>[14]</sup>以及数值模拟方面<sup>[15]</sup>,对地下管廊的地震响应做了系统研究。Stamos 和 Boko 研究对象为圆形隧道,不适合双仓预制管廊的分析,而 Tateishi 的研究是基于近场和结构的加速度响应与自由场保持一致这个假设,与实际有出入。离心机试验是当前地下结构抗震研究的有效手段,但费用较为昂贵。目前振动台试验和数值模拟研究主要集中在单仓结构,不能适应现在多仓结构的需要。

本研究针对双仓矩形截面地下管廊的抗震性能及其周围土体的地震响应特性,利用重庆大学岩土工程实验室美国 ANCO 振动台试验系统开展了一系列试验研究。为了监测模拟地震过程中结构及其周围土体的相关地震响应,在管廊结构和周围土体中布置了一系列传感器。紧接着利用相关 Matlab 数据处理技术,得出了在 El Centro 这种实际地震波下,双仓矩形截面地下管廊以及周围土体的地震响应特征。另外,考虑到振动波频率特性可能对地下结构地震响应造成的影响,利用一系列频率的正弦波,开

展了不同频率正弦波作用下的振动台试验,得出了振动波频率对地下管廊结构体系的影响规律。

## 1 试验设计及传感器布置

振动台试验模型试验是目前地下结构抗震研究的主要技术手段之一<sup>[3]</sup>。图1是本次试验所采用的小型振动台试验系统,试验时能达到的最大加速度峰值为1.5g~2.0g,本振动台系统配备有叠层式钢制剪切土箱,其尺寸为85×95×65 cm(长×宽×高),能很好地模拟地震作用下岩层的剪切效应,从而消除地震波在边界处产生碰撞反射引起复杂的边界效应<sup>[16-17]</sup>。

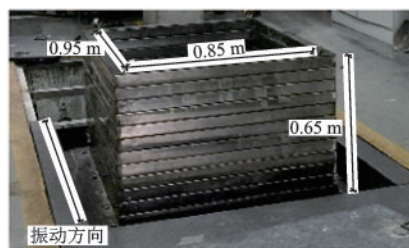


图1 小型振动台试验系统

Fig.1 Small-scale shaking table test system

本次研究是以一截面尺寸为6.7×4.5 m、埋深为2.0~2.5 m的待建双仓综合管廊为参考。考虑到振动台台面尺寸限制,需要根据相似理论以及相关研究<sup>[4]</sup>对研究对象的尺寸、物理力学特性及时间参数进行相似设计。本次试验的相似比设计中,首先根据模型箱的大小选定长度相似比 $S_L=1:15$ ,选定弹性模量的相似比 $S_E=1:3$ ,再根据振动台的性能上限,选定加速度相似比为5(换算成原型加速度约为0.3g~0.4g),则根据重力失真情况下的关系式 $S_p=S_E/(S_a*S_L)=1.0$ ,由此计算得到密度的相似比,最终参数的相似比如表1所示。

由相似比设计,使用特定水灰比配置的微粒混凝土和镀锌铁丝制成的双仓管廊模型尺寸为80 cm×44.67 cm×30 cm(长×宽×高),以满足土箱的尺寸限制,实测该微粒混凝土的弹性模量为6062 MPa。据实际工程建设场地条件,需开展砂土场地的地下管廊抗震性能试验研究,试验中采用福建标准砂干砂对其进行模拟。根据吴琪等人的研究<sup>[18]</sup>,福建标准砂级配曲线如图2所示,其中的平均粒径 $d_{50}$ 为0.60 mm,不均匀系数 $C_u$ 为4.5,试验中测

表1 试验模型主要参数相似比设计

Table 1 Similarity ratio design of main parameters of the test model

长度 (选定)	应力 (选定)	弹性模量 (计算)	加速度 (选定)	密度 (计算)	时间 (计算)	配筋
$S_l$	$S_\sigma$	$S_E = S_\sigma / S_\epsilon$	$S_a$	$S_\rho = S_E / (S_l \cdot S_a)$	$S_t = (S_l / S_a)^{1/2}$	按照钢筋与混凝土的面积强度乘积比一致
1:15	1:3	1:3	5:1	1:1	1:8.67	

注:本双仓管廊的几何相似比为 1:15

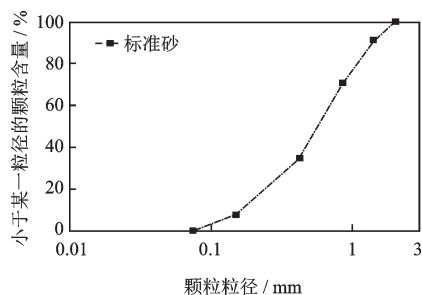
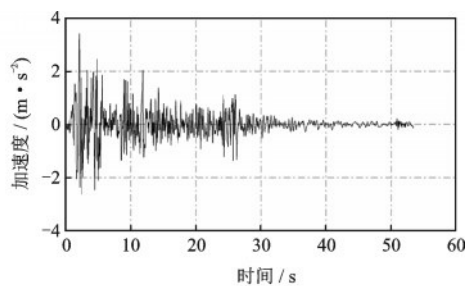


图2 福建标准砂级配曲线<sup>[18]</sup>

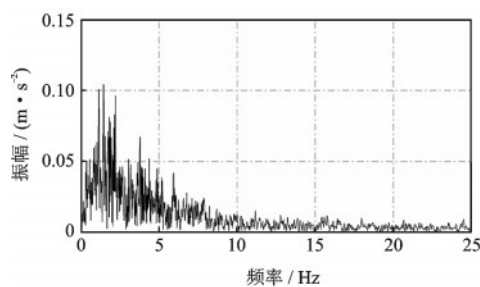
Fig.2 Particle size distribution curve of the standard sand of Fujian Province<sup>[18]</sup>

得颗粒相对密度  $G_s$  为 2.63, 最大干密度  $\rho_{d, \max}$  为  $1745 \text{ kg/m}^3$ , 最小干密度  $\rho_{d, \min}$  为  $1350 \text{ kg/m}^3$ 。根据室内实验以及参考郭莹和陈珍的研究<sup>[19]</sup>可知, 标准砂粘聚力  $c$  为 0, 内摩擦角  $\varphi$  约为  $40^\circ$ , 关于标准砂的动力学特性, 李瑞山等人<sup>[20]</sup>也做了大量研究工作。试验中通过分层夯实的方法控制模型土的密实度, 最终模拟砂土地地的密度约为  $1740 \text{ kg/m}^3$ 。

根据谢礼立和翟长海 2003~2005 年的研究, 1940 年的 El Centro 地震波比较适合 II、III 类场地的抗震试验研究<sup>[21-22]</sup>, 其持时为 53.46 s、峰值加速度为 0.349g, 其时程曲线和傅里叶谱频谱如图 3 所示。为了研究地震过程中不同场地峰值加速度 PGA (Peak ground acceleration) 引起的地震响应差异, 试验中将原始地震波的 PGA 调整到 0.2g、0.4g、0.8g、1.2g。另外, 考虑到振动波的频率特性<sup>[23-24]</sup>, 选取 PGA 为 0.2 g、不同频率的正弦波作为振动输入波, 以此来研究综合管廊结构-土体系的频率特性。同时, 因为本次试验的振动台能够施加的正弦波频率范围为 0~50 Hz, 因此考虑管廊在真实地震波 El Centro 下的响应, 同时设计了 5、10、15、20、25 Hz 和 30 Hz 等频率的正弦波于其进行对比, 如图 4 所示为 5 Hz 正弦波激励曲线, 其余的激励曲线与此类似。振动波为由基底垂直向上传播的剪切波, 其振动方向沿着垂直于管廊结构的延长方向, 在叠层式土箱的辅助作用下, 实现了模拟场地上下岩层间的剪切



(a) 时程曲线



(b) 傅里叶谱

图3 原始 El Centro 地震波时程曲线及其傅里叶谱  
Fig.3 Original acceleration time history and Fourier spectrum of El Centro earthquake

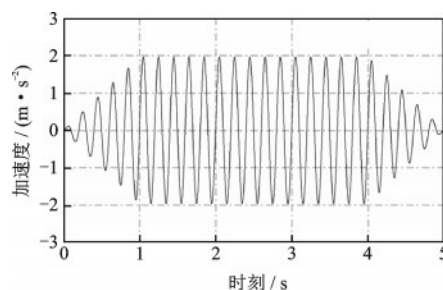


图4 5 Hz 正弦波激励曲线

Fig.4 The input sine wave with frequency of 5 Hz

错动效果。

考虑到结构的对称性, 以管廊截面纵轴线为对称轴, 土压力传感器和加速度传感器呈对称布置, 如图 5 所示。为了研究管廊结构在延长方向上的应变响应特征, 在管廊结构的端部截面和中部截面内外壁分别布置了一系列应变片, 如图 6 所示。

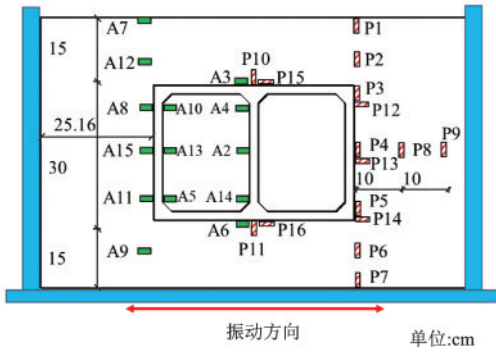


图5 加速度计和土压力传感器布置

Fig.5 Arrangement for accelerometers and earth pressure sensors

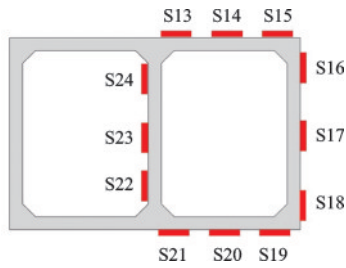


图6 应变片布置

Fig.6 Arrangement for strain gauges

## 2 El Centro 地震波下的试验结果与讨论

### 2.1 加速度响应

图7反映了在不同输入PGA地震波下,管廊侧壁邻近土体沿深度的最大加速度响应。从整体来看,不同PGA下最大加速度响应均随深度逐渐减小。在输入PGA较大时(0.8g、1.2g),最大加速响应随着深度先减小,然后在管廊侧壁中下部转而逐渐增大,这可能是土与结构相互作用引起的。上述现象说明两点,一是当输入峰值加速度PGA较大

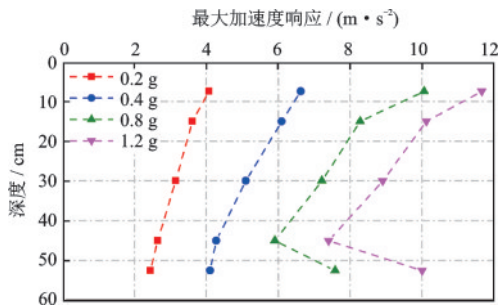


图7 邻近管廊侧壁土体最大加速度响应沿深度分布

Fig.7 Maximum acceleration response along depth in the soil next to the sidewall of the utility tunnel

时,地下结构对周围土体的运动响应所体现的影响则越发明显;二是在地震过程中,沿深度各地层的运动模式并不是保持一致的,特别是由于地下结构的存在时,此现象更为显著。所以在地震过程中,土层之间时刻在发生着差异剪切运动,尤其是当PGA较大、距离地下结构较近时。因此在地下综合管廊建设中,要采取措施改进周围土体的强度和阻尼特性,以缓解地震时由于土层的差异剪切过程引起结构的损伤。

如图8所示,当输入PGA在0.2g~1.2g之间变化时,加速度放大系数在0.6~2.2之间变化,分布规律与图7中的最大加速度响应类似,且加速度放大系数随着输入PGA的增大而减小。具体来看,在地表处以及输入PGA较小时,加速度放大系数会出现最大值,而当PGA较大以及在土层更深处,加速度放大系数往往更小。由此说明土层的加速度放大系数在靠近地表位置比较大,这与土层在水平地震作用下的剪切运动模式有关,这与Yan Kongming (2018)<sup>[9]</sup>、Chen Jun(2010)<sup>[25]</sup>等人的研究结论比较一致。例如PGA为0.2g而深度为7.5 cm时,加速度放大系数为2.07;PGA为1.2g而深度为52.5 cm时,分别为0.63。由于地下管廊在实际工程中一般采用浅埋,因此在地震区建议进行必要的地震验算,或采取一定的抗震措施。

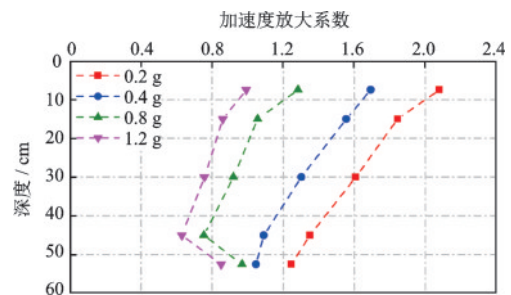


图8 邻近管廊侧壁土体加速度放大系数沿深度分布

Fig.8 Distribution of acceleration amplification along depth in the soil next to the sidewall of the utility tunnel

在对应于外壁土体中的三个加速度测点位置,在管廊侧壁内壁由上而下也依次布置了三个加速度测点,以研究管廊结构和周围土体在地震中的运动特征,上述六个测点的加速度响应时程曲线如图9所示。由时程曲线可知,各PGA地震波下管廊侧壁与周围土体的加速度时程曲线总是基本保持一致,说明在地震过程中管廊结构侧壁与周边土体还

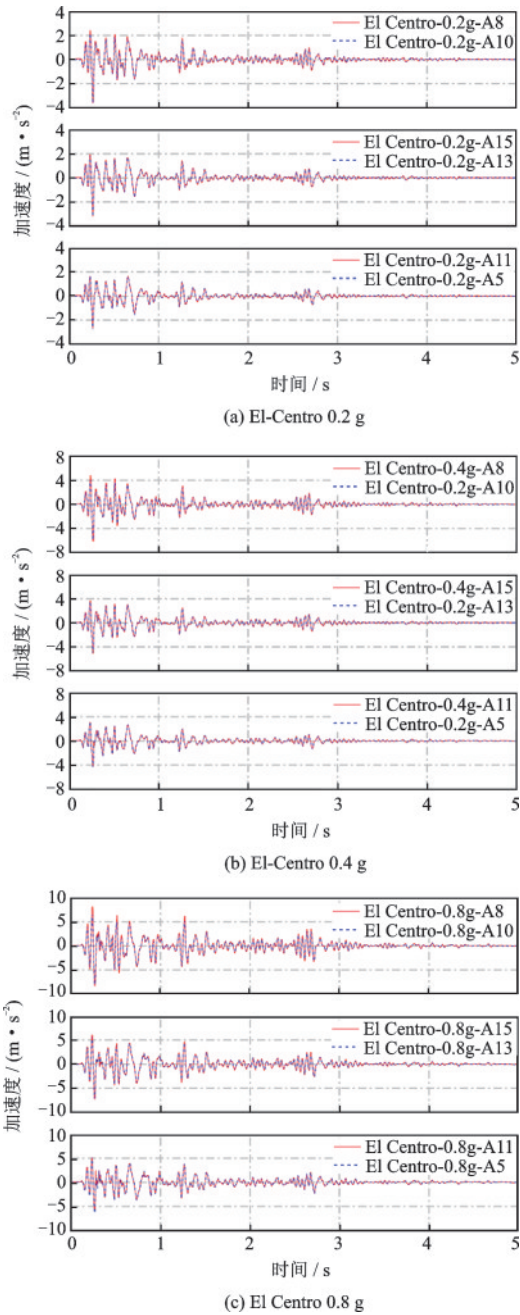


图9 土体和管廊结构加速度响应时程曲线对比  
Fig.9 Comparison of acceleration time history between the structure and the surrounding soil

是保持基本一致的运动模式,这与史晓军等人于2010年通过振动台试验得出的结论比较一致<sup>[4]</sup>。但从曲线细微上看,在管廊结构侧壁中上部位置处,土体的加速度响应略微大于结构的响应,在PGA为0.8g时更为明显,这说明土体与结构在动力作用下会发生分离,庄海洋等人通过数值模拟也得出了这一结论<sup>[26]</sup>。另外,随着输入PGA的增加,相同时刻的加速度响应也不断增大。

## 2.2 土压力响应

本次试验中测出的是土压力增量响应,正值表示土压力增大,负值表示土压力减小。由图10可知当输入不同PGA(0.2g、0.4g、0.8g和1.2g)地震波时,最大土压力响应沿深度总是呈现倒立的“W”形分布,即最大土压力响应发生在管廊侧壁的顶部和底部两处。该分布特征可能是由于管廊侧壁与土体之间的相互作用,引起了水平向的土拱效应所致。从运动角度来看,因为管廊侧壁围绕侧壁中点做来回的剪切运动,顶底部与土之间的相对位移比较大、中间比较小,因此土压力也是侧壁顶底部大于中部。另外,随输入PGA的增大,各测点最大土压力响应也随之增大。由上述分析可知,在地震作用下,地下结构周围土体的动土压力响应特征与深度、土-结构相互作用,输入峰值加速度等因素有关,这与M. Azadi和S.M. Mir Mohammad Hosseini(2007)<sup>[27]</sup>、Wang Guobo(2018)等人<sup>[1]</sup>的研究结论比较一致。

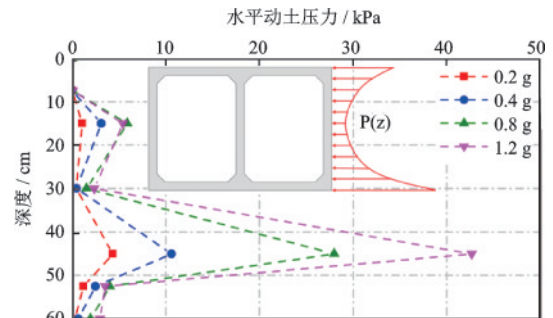


图10 邻近管廊侧壁土体沿深度最大土压力响应  
Fig.10 Maximum dynamic earth pressure response along depth in the soil next to the sidewall

图11反映了在El Centro地震波下,当输入不同PGA时(0.2g、0.4g、0.8g和1.2g),管廊侧壁沿深度从上到下三个土压力测点(p3、p4和p5)测出的土压力响应时程曲线。可以看出,在地震过程中,管廊底部的土压力响应一般均大于其他两点的响应,顶部次之,中部最小,尤其是在最大土压力响应发生的时刻,这进一步验证了之前关于水平向土拱效应的推断。上述研究结论与陈国兴等人的研究成果是一致的<sup>[3]</sup>,这也证明了本次研究结果的正确性。而且在振动结束后,三个测点的土压力均未恢复原状,由此说明相比地震发生前土体的应力场,地震过后其已经发生了变化。

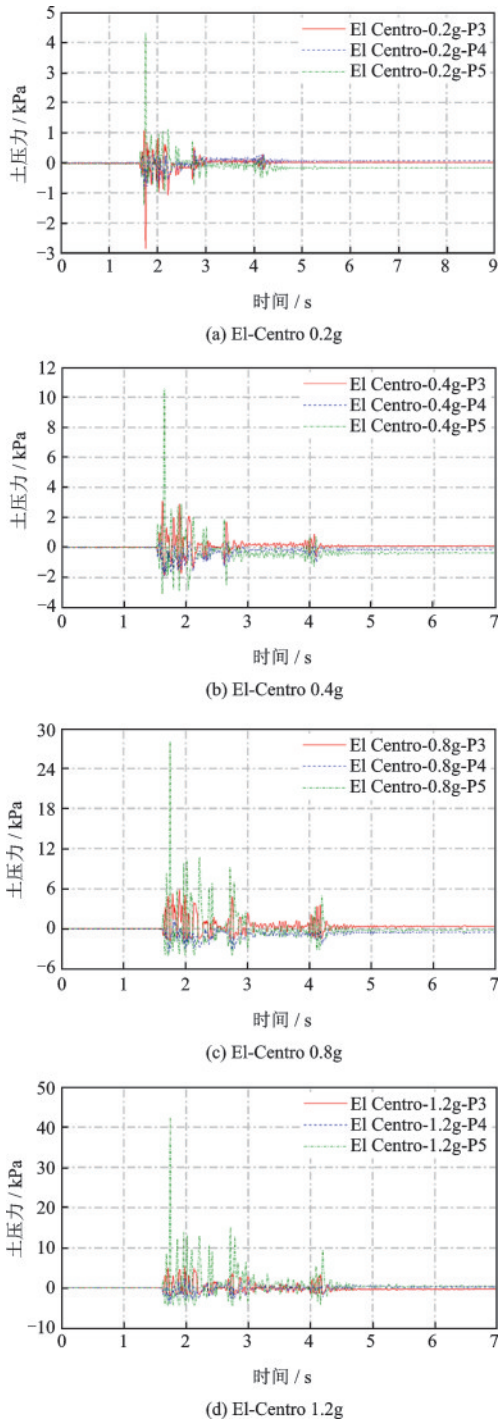


图 11 邻近管廊侧壁土体动土压力响应时程曲线

Fig.11 Time history curves of dynamic earth pressure of the surrounding soil next to the sidewall

由图 11 可知,相比较于初始土压力场,地震过后可能会减小,也可能会增大,没有特别明显的规律,但在管廊中下部,往往会在震后变小。这说明在地震过后,管廊结构与周围土体可能出现局部脱离、局部挤密的现象,往往在结构中下部易出现局部脱离,而在中上部会易出现局部挤密。为了考察

震后土压力场的变化,利用式(1)进行计算分析。

$$P_{r/d} = \frac{P_r}{P_{d_{\max}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $P_r$  为震后土压力, Pa;  $P_{d_{\max}}$  为地震过程中最大动土压力响应, Pa; 而  $P_{r/d}$  为反映震后土压力相对最大动土压力大小的值。

计算结果如表 2 所示,震后土压力相比于最大动土压力的作用小得多,对于 P4 测点,  $(P_r/P_{d_{\max}}) \times 100\%$  的值为 14.05%~35.48%; 对于 P3 和 P5 测点,该值为 0.48%~6.23%。

表 2 震后土压力  $P_r$  和最大动土压力  $P_{d_{\max}}$  比较

Table 2 Comparison of the post-earthquake earth pressure  $P_r$  and the maximum earth pressure  $P_{d_{\max}}$

单位:%

测点	P3	P4	P5
0.2g	0.48	14.25	4.00
0.4g	3.10	31.27	3.41
0.8g	6.23	35.48	0.62
1.2g	5.19	14.05	1.13

### 2.3 应变响应

混凝土结构最易发生的破坏是拉应力引起的结构裂缝,因此很有必要分析在地震荷载作用下,结构中的应变响应特征。考虑到结构中的最不利情况,提取各个测点的最大拉应变响应进行分析,如图 12 所示。可以看出,在既定的输入 PGA 下,各个侧面的转角处会有较大的最大应变响应,而各个侧边中点则很小。各测点的最大应变响应随输入 PGA 的增大而增大,顶部转角测点最大拉应变为  $10 \times 10^{-6} \sim 60 \times 10^{-6}$ ,底部和右侧截面为  $10 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ ,中隔墙右侧为  $10 \times 10^{-6} \sim 90 \times 10^{-6}$ 。相比较之下,中间测点除了底部外壁的变化范围为  $0 \times 10^{-6} \sim 20 \times 10^{-6}$  外,其余各侧边均为  $0 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ 。上述结果也很好解释了为什么在地震发生时,结构角部易产生裂缝这一现象<sup>[28]</sup>。

根据结构力学原理,刚性转角在相同截面条件下,转角两侧的应变响应应当保持一致,但试验数据并不完全一致,这主要是是应变片贴合质量所引起的误差。另外,各侧边中点也产生较小的拉应变响应,这主要是由侧边的动土压力所引起的。上述研究表明,在综合管廊的抗震设计中,应充分考虑结构转角的力学响应特征,并采取合理提高其强度。

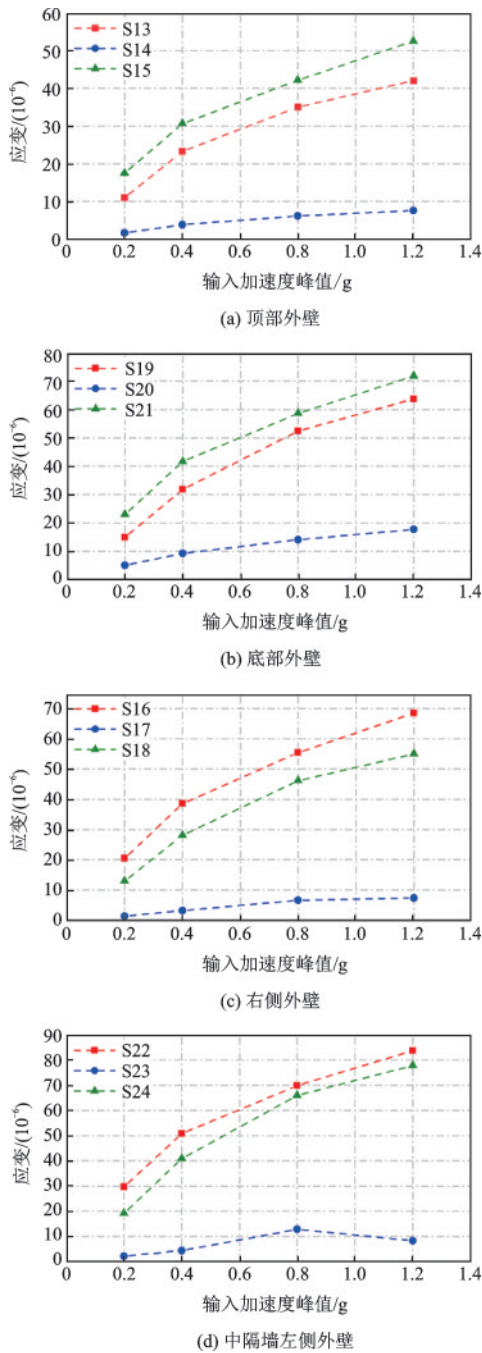


图12 结构中的应变响应

Fig.12 Strain response in the structure

### 3 正弦波下管廊结构及周围土体地震响应

根据相关学者的研究,地震波的频谱特性对结构的地震响应有非常显著的影响<sup>[23-24]</sup>,然而实际地震波中频率成分十分丰富,研究起来比较困难。但是简正弦波则相对简单,给定频率和PGA后,其振动规律是可以完全人为控制的。并且也有学者应

用一系列正弦波来开展振动台试验,以研究场地和地下结构自振频率的影响<sup>[29]</sup>。

目前,采用系统刚度来计算其共振频率得到很多人的认可,但是对于一个复杂的结构体系,尤其是地下结构体系,其刚度并不是单纯的结构几何截面形式的函数<sup>[3]</sup>,其系统刚度难以准确确定,因此本次试验中不适合通过此法计算共振频率。目前最好的方法还是采用现场试验,且由于本次试验属于相似模拟试验,可用一系列正弦波来研究场地和地下结构组成的体系的固有频率。为此,在0.2g的输入峰值加速度PGA下,进行了5、10、15、20、25 Hz以及30 Hz的正弦波振动试验。

根据各个相应响应测点的数据,提取出最大响应来进行分析,关于最大动土压力响应、最大加速度响应以及最大应变响应随不同频率的变化曲线,如图13~图15所示。

可以看出,最大动土压力、最大加速度以及最大应变均在15 Hz时产生了相比较其他频率更为明显的响应,由此可以说明,在本次试验条件下,该双仓管廊结构-土体系的固有频率大致在15 Hz附近。本次试验中虽然使用了可以剪切变形的叠梁

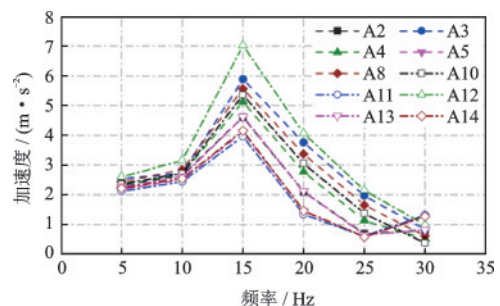


图13 不同频率正弦波下的加速度响应

Fig.13 Acceleration response of sinusoidal wave with different frequencies

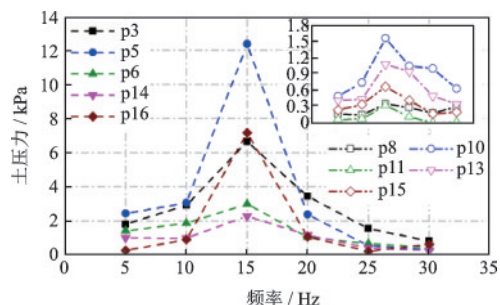


图14 不同频率正弦波下的土压力响应

Fig.14 Earth pressure response of sinusoidal wave with different frequencies

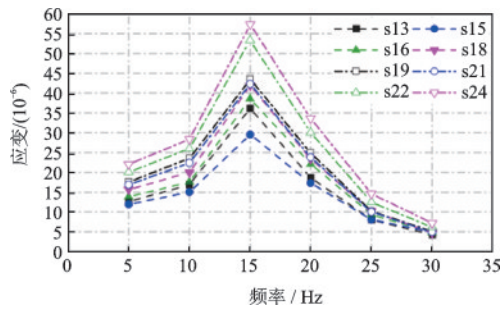


图 15 不同频率正弦波下的应变响应

Fig.15 Strain response of sinusoidal wave with different frequencies

式土工模型箱,但是由于振动台的尺寸限制,实验存在的尺寸效应未能完全消除,可能存在振动波反射导致结果频率偏高的情况。另外从图中可以看出,不同测点的响应在不同频率下会有不同程度的差异,这一差异在输入正弦波频率为 15 Hz 时最为明显,而在其他频率处较小,尤其是当输入正弦波频率为 30 Hz 时,加速度响应、土压力响应和应变响应均表现出较小差异,只有加速度响应在低频(5 Hz)时也表现出较小差异。

由此说明,频谱特性不仅对场地和地下结构的地震响应程度有明显影响,还对不同位置处引起的地震响应差异会有显著影响,并且在体系自振频率下该差异最为显著。对于土压力响应,除了位于管廊底部的 P16 测点外,由其他竖向土压力测点测出的响应均较水平向土压力响应要小得多,同时也只有位于管廊顶部的 P10 测点测出的水平向土压力响应较其他水平向土压力要小得多,如图 14 所示。

## 4 结 论

(1) 管廊侧壁沿深度最大土压力响应呈现倒立的“W”形分布,这可能是水平向产生土拱效应引起的。根据动土压力的时程曲线特征,经地震作用后,结构周围土体的土压力场也发生了改变。

(2) 沿管廊侧壁深度,输入  $PGA$  较小时,最大加速度响应随深度逐渐减小;输入  $PGA$  较大时最大加速度响应先随深度减小,在管廊中下部转而增大。在地震过程中,结构与其周边土体保持基本一致的运动模式。加速度放大系数随着输入峰值加速度增大而减小,大多情况大于 1.0。

(3) 在地震荷载作用下,在结构转角处会产生较大的最大拉应变,相比较之下各侧边中点最大拉

应变很小,但均随输入  $PGA$  的增大而增大。

(4) 场地和管廊结构组成的体系受频率特性影响显著,当正弦波频率为 15 Hz 时,结构和场地的地震响应最为剧烈,而且在 15 Hz 正弦波下,不同测点响应显现出来的差异也最明显;在 30 Hz 时,加速度响应、土压力响应和结构应变响应在不同测点处差异较小,且加速度响应在 5 Hz 的正弦波作用下也表现出该特性。

## 参考文献:

- [1] Wang G B, Yuan M Zh, Miao Y, et al. Experimental study on seismic response of underground tunnel-soil-surface structure interaction system [J]. Tunnelling Underground Space Technology, 2018, (76): 145-59.
- [2] 杜修力,王刚,路德春.日本阪神地震中大开地铁站地震破坏机理分析[J].防灾减灾工程学报,2016,36(2):165-171.  
Du X L, Wang G, Lu D Ch. Earthquake damage mechanism analysis of Dakai metro station by Kobe earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 165-171. (in Chinese)
- [3] 陈国兴,陈苏,杜修力,等.城市地下结构抗震研究进展[J].防灾减灾工程学报,2016,36(1):1-23.  
Chen G X, Chen S, Du X L, et al. Review of seismic damage, model test, available design and analysis methods of urban underground structures: retrospect and prospect [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 1-23. (in Chinese)
- [4] 史晓军,陈隽,李杰.非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(I)——试验方法[J].地震工程与工程振动,2010,30(1):147-154.  
Shi X J, Chen J, Li J. Shaking table test on utility tunnel under non-uniform seismic excitations (I): Experimental setup [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(1): 147-154. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] Tateishi A. A study on seismic analysis methods in the cross section of underground structures using static finite element method [J]. Structural Engineering, 2005, 22(1): 41s-53s.
- [7] 王国波,袁明智,苗雨.结构-土-结构相互作用体系地震响应研究综述[J].岩土工程学报,2018,40(5):

- 837-847.
- Wang G B, Yuan M Zh, Miao Y. Review of seismic response of structure-soil-structure interaction system. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(5): 837-847. (in Chinese)
- [8] 刘晶波, 谭辉, 宝鑫, 等. 土-结构动力相互作用分析中基于人工边界子结构的地震波动输入方法 [J]. 力学学报, 2018, 50(1): 32-43.
- Liu J B, Tan H, Bao X, et al. The seismic wave input method for soil-structure dynamic interaction analysis based on the substructure of artificial boundaries [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(1): 32-43. (in Chinese)
- [9] Yan K, Zhang J, Wang Z, et al. Seismic responses of deep buried pipeline under non-uniform excitations from large scale shaking table test [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2018, (113): 180-192.
- [10] Singh D K, Mandal A, Karumanchi S R, et al. Seismic behaviour of damaged tunnel during aftershock [J]. Engineering Failure Analysis, 2018, (93): 44-54.
- [11] Mason H B, Trombetta N W, Chen Z, et al. Seismic soil - foundation - structure interaction observed in geotechnical centrifuge experiments [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 48(6): 162-174.
- [12] 施有志, 柴建峰, 林树枝, 等. 地下综合管廊边界条件对地震动力响应影响数值分析 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(1): 213-225.
- Shi Y Zh, Chai J F, Lin Sh Zh, et al. Numerical analysis on influence of boundary conditions on seismic dynamic response of underground utility tunnels [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(1): 213-225. (in Chinese)
- [13] Jiang L Zh, Chen J, Li J. Seismic response of underground utility tunnels: shaking table testing and FEM analysis [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 9(4): 555-567.
- [14] 陈隽, 史晓军, 李杰. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(II)——试验结果 [J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 123-130.
- Chen J, Shi X J, Li J. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform seismic excitations (II): experimental results [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(2): 123-130. (in Chinese)
- [15] 蒋录珍, 陈隽, 李杰. 非一致地震激励地下综合管廊振动台模型试验研究(III)——数值模拟 [J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(3): 45-52.
- Jiang L Zh, Chen J, Li J. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform seismic excitations (III): numerical simulation [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(3): 45-52. (in Chinese)
- [16] 曹文冉, 田伟, 李春. 双向叠层剪切箱的研制及模型土体振动台试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增2): 249-253.
- Cao W R, Tian W, Li Ch. Development of 2-D laminar shear box and shaking table tests on model soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Sup2): 249-253. (in Chinese)
- [17] 陈国兴, 王志华, 左熹, 等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(1): 89-97.
- Chen G X, Wang Zh H, Zuo X, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(1): 89-97. (in Chinese)
- [18] 吴琪, 丁选明, 陈志雄, 等. 不同地震动强度下珊瑚礁砂地基中桩-土-结构地震响应试验研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 1-11.
- Wu Q, Ding X M, Chen Zh X, et al. Experimental study on seismic response of pile-soil-structure in coral sand under different earthquake intensity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 1-11. (in Chinese)
- [19] 郭莹, 陈珍. 成样方法对饱和中砂静力三轴固结排水剪切试验结果的影响 [J]. 土木工程学报, 2010, 43(增2): 306-311.
- Guo Y, Chen Zh. The influence of sample-preparing methods on experiment results of saturated medium sand in static tri-axial consolidation drained shear test [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(Sup2): 306-311. (in Chinese)
- [20] 李瑞山, 陈龙伟, 袁晓铭, 等. 荷载频率对动模量阻尼比影响的试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 71-80.
- Li R Sh, Chen L W, Yuan X M, et al. Experimental study on influences of different loading frequencies on dynamic modulus and damping ratio [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 71-80. (in Chinese)
- [21] 谢礼立, 翟长海. 最不利设计地震动研究 [J]. 地震学报, 2003, 25(3): 250-261.
- Xie L L, Zhai Ch H. Study on the severest real ground motion for seismic design and analysis [J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 25(3): 250-261. (in Chinese)
- [22] 翟长海, 谢礼立. 抗震结构最不利设计地震动研究

- [J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 51-58.
- Zhai Ch H, Xie L L. The severest design ground motions for seismic design and analysis of structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(12): 51-58. (in Chinese)
- [23] Cakir T. Evaluation of the effect of earthquake frequency content on seismic behavior of cantilever retaining wall including soil - structure interaction [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, (45):96-111.
- [24] 张如林, 张志伟, 程旭东, 等. 地震动频谱特性对罐液体系地震响应的影响分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(3): 441-447.
- Zhang R L, Zhang Zh W, Cheng X D, et al. The Effect of Earthquake Frequency Characteristics on the Seismic Behavior of Tank-liquid System[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(3): 441-447. (in Chinese)
- [25] Chen J, Shi X J, Li J. Shaking table test of utility tunnel under non-uniform earthquake wave excitation [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30 (11): 1400-1416.
- [26] 庄海洋, 吴滨, 陈国兴. 土-大型地铁地下车站结构动力接触效应研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34 (6): 678-686.
- Zhuang H Y, Wu B, Chen G X. Study on dynamic contact properties of soil-subway underground structure interaction system[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34 (6) : 678-686. (in Chinese)
- [27] Azadi M, Hosseini S M M M . The impact of underground tunnel excavation on adjacent buildings during earthquake case study: shiraz underground, iran [J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 12.
- [28] Iida H, Hiroto T, Yoshida N, et al. Damage to Daikai subway station [J]. Soils and Foundations, 1996, (jan): 283-300.
- [29] Tamari Y, Towhata I. Seismic soil-structure interaction of cross sections of flexible underground structures subjected to soil liquefaction [J]. Soils and Foundations, 2003, 43(2): 69-87.

(本文责编: 苏泽云)