马鸿敏,马建勋.综合管廊横向振动台试验设计[J].地震工程学报,2020,42(1):175-181.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.175
MA Hongmin, MA Jianxun.Design of a Transverse Shaking Table Test for Utility Tunnels[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(1):175-181.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.175

综合管廊横向振动台试验设计

马鸿敏,马建勋
(西安交通大学人居环境与建筑工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 在基于文献调研及综合考虑试验目的、试验条件、试验经费的基础上对于综合管廊横向振动台试验进行详细设计。首先,对于试验中所需的振动台、模型箱、测试元件等试验设备进行设计与选择。其次,对于试验中两大主要方面:模型相似比和模型配筋进行研究。在相似比设计中依据 Bockingham π 定理以加速度、密度、弹性模量、长度这 4 个参数为基本量,考虑采用忽略重力模型,从而推导出其余相似比。模型配筋设计中由于无论单层综合管廊还是双层综合管廊原型结构配筋均较为简单同时考虑受力的合理性,本次配筋采用等面积配筋率原则。再次,基于地下结构地震反应特点选用 El-Centro 波、Kobe 波、Taft 波,试验加载采用分段逐次加载,并给出详细的加载制度。最后,基于前期二维模型的数值模拟,给出单层及双层综合管廊的测试元件布置图。

关键词: 综合管廊; 振动台试验; 相似比; 加载制度; 测试元件

中图分类号: TU91; TU435　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-0844(2020)01-0175-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.01.175

Design of a Transverse Shaking Table Test for Utility Tunnels

MA Hongmin, MA Jianxun
(*School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China*)

Abstract: Based on an investigation of the literature and a comprehensive consideration of test purposes, test conditions, and test funds, a transverse shaking table test for utility tunnels was designed in detail. First, test facilities such as shaking table, model box, and testing element are introduced. Second, the two main aspects of the experiment, model similarity ratio and model reinforcement, were studied. In designing the similarity ratio, the four parameters of acceleration, density, elastic modulus, and length, were taken as basic quantities. Then, according to the Bockingham π theorem and the gravity neglected model, other similarity ratios were derived. Reinforcement of the prototype structure was simple, thus, the equal area reinforcement ratio principle was adopted in the design of the model for this test, accounting for the rationality of the force. Third, based on the seismic response of the underground structure, El Centro, Kobe, and Taft waves were selected, and a detailed loading system is given. Finally, based on the numerical simulation in a previous two-dimensional model, the layout of test elements for the utility tunnel

收稿日期: 2018-04-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(51178390)
第一作者简介: 马鸿敏(1993-),男,博士研究生,主要从事岩土及地下工程抗震研究。E-mail:mahongmin@stu.xjtu.edu.cn。
通信作者: 马建勋(1961-),男,博士,教授,主要从事地下工程抗震相关研究。E-mail:matumu@163.com。

is present.

Keywords: utility tunnel; shaking table test; similarity ratio; loading system; test sensor

0 引言

自 1995 年日本神户地震以来,世界范围内的专家、学者逐渐认识到地下工程抗震研究的重要性。目前关于地下结构的抗震研究主要采用现场原位观测、模型试验、数值模拟这 3 种方法。在这 3 种方法中模型试验以其可重复、精度高、试验现象清晰等优点在目前地下结构抗震研究中最为常用。

S.Okamoto[1]对于采用硅橡胶制成的隧道模型进行了振动台试验,测量了模型的位移值和应变值。季倩倩[2]、杨树德等[3-5]针对上海地区车站开展了地铁车站以及区间隧道的振动台试验,这是国内第一次将振动台试验应用于地下结构的抗震研究。庄海洋[6]、陈国兴等[7]开展了南京深厚可液化场地下双层地铁车站以及区间隧道的单向振动台试验研究。车爱兰等[8]建立了大开地铁车站的振动台模型试验,对于地震中作用结构的土压机理进行详细研究。权登州等[9-10]基于西安黄土层进行了黄土地区双层地铁车站的振动台试验,研究了黄土地层中地铁车站的加速度反应、位移反应、土压力反应等结构反应。马玉杰[11]对于邻近地裂缝带地铁隧道和围岩地层的地震响应和二者动力相互作用机制进行了分析。邹炎[12]对于饱和砂土中的三层地铁车站进行振动台试验,对于试验中的孔压、土层加速度、土层平均剪应变等研究。谌凯[13]以福州轨道 1 号线车站为背景开展了双层地铁车站模型的非一致地震激励的振动台试验,研究了车站结构的应变反应以及车站端部土压力反应。朱言灯[14]对于全黏土地层以及含有砂土夹层情况下的双层车站进行了单向和双向地震输入试验研究。岳庆霞[15]、李杰等[16]开展了一致激励下单舱综合管廊横向振动台试验,初步对于单舱综合管廊的加速度反应进行了研究。史晓军[17]、Chen J[18-19]进行了单舱综合管廊的系列试验,研究了单舱管廊的横向一致激励及非一致、纵向一致激励及非一致试验,对于单舱综合管廊的地震反应进行了较系统的研究。

虽然目前国内外已经进行了较多对地下结构的抗震研究,但大多把重点放在地铁车站以及区间隧道上,而专门研究综合管廊结构的很少。现阶段基于城市发展的需求以及经济实力,我国开始推进智慧城市建设,大规模的建设综合管廊。我国地处两大地震带范围内,属于地震多发国家,因此现阶段我国急需开展综合管廊抗震的相关研究。本文的综合管廊横向振动台试验设计是在充分的文献调研的基础上结合实际经费及试验条件等因素做出了详细的试验设计,为下一步振动台试验打下坚实基础。

1 测试设备

1.1 振动台

振动台按照台面数量分为单台振动台、双台面振动台以及多台面振动台阵。本次试验输入的地震激励为一致激励,所以选用单台振动台。振动台按照其振动的方向分为:单向、双向、三向。本次试验是综合管廊横向振动台试验,故单向振动台即可满足要求。本次试验拟在西安建筑科技大学结构工程与抗震教育部重点试验室进行,其振动台主要参数如下:(1)台面尺寸 4.1 m×4.1 m;(2)满负荷下最大试件重量 20 t,减负荷下为 30 t;(3)试件最大偏心距≥0.6 m,试验频率 0.1~100 Hz;(4)最大位移:水平 X 向±15cm、水平 Y 向±25 cm、竖向±10 cm;(5)最大速度:水平 X 向±100 cm/s、水平 Y 向±125 cm/s、竖向±80 cm/s。

1.2 模型箱

模型箱是在振动台试验中盛装模型体系的箱型结构。自振动台试验开展以来人们按照试验所需设计制造出了多种类型的模型箱。按照模型箱的机理以及对于模型体系的约束情况大体分为:刚性模型箱、柔性模型箱、层状剪切模型箱。由于层状模型箱在振动台试验中对于模型地基边界效应小、在垂直于振动方向刚度较大、在平行于振动方向刚度小,且能模拟出土层的剪切变形,所以本次试验采用层状剪切模型箱。由于本次试验中的造价问题,试验中在振动台台面布置两个模型箱,模型箱中分装双层双舱综合管廊以及单层三舱综合管廊。模型箱的尺寸在下面几何相似比确定后进行计算分析。

1.3 测试元件

本次试验中需要测量的数据类型有:土体加速度、结构加速度、土层剪切变形、混凝土应变、钢筋应变、土-结接触面土压力、土层表面的沉降。针对所需测量的数据类型选用的测试元件有:土体加速度

计、结构加速度计、位移计（激光式测量土体表面沉降，拉线式测量土层剪切变形）、应变片（钢筋应变片、混凝土应变片）、土压力计。

2　方案设计

2.1　相似比设计

相似理论依据 Bockingham π 定理，相似设计中采用的方法为动力学方程和量纲分析法结合考虑。相似比设计中选取长度、弹性，模量、加速度以及密度为基本物理量。由于试验中集合相似比较小，结构各个构件尺寸均较小，若在结构模型中施加附加质量可能在试验中造成质量块施加位置管廊结构的破坏。同时，由于该试验中需要测量的数据多，质量块的施加会对测试元件产生不利影响，故本次试验对于结构不附加质量，试验模型为忽略重力模型。相似比设计中的基本方程为：

$$\frac{S_E}{S_\rho S_a S_l}=1$$

式中：S_E 为弹性模量相似比；S_ρ 为密度相似比；S_a 为加速度相似比；S_l 为长度相似比。按照试验要求，选取几何相似比 S_l 为 1/10，计算出其余相似比（表 1）。

表 1　模型与原型的相似关系

Table 1　Similarity relation between model and prototype

内容	物理参数	相似关系	相似比
几何关系	长度 l	S_l	1/10
	位移 μ	$S_\mu = S_l$	1/10
材料关系	弹性模量 E	S_E	1/5
	密度 ρ	$S_\rho S_a=2$	1
	应力 o	$S_o=S_E$	1/5
	应变 ε	S_ε	1
	质量 m	$S_m=S_oS_l{}^2/S_a$	1/1 000
动力关系	加速度 a	$S_\rho S_a=2$	2
	速度 v	$S_v=\sqrt{S_lS_a}$	0.447
	周期 T	$S_T=\sqrt{S_L/S_a}$	0.224
	频率 f	$S_f=\sqrt{S_a/S_L}$	4.472

在满足类似圣维南原理的情况下，振动台试验中地铁车站的长度计算公式为：

$$L=2\times0.76\times W+l$$

式中：L 为车站长度；W 为宽度；l 为车站柱距。为便于测量，取管廊中间满足圣维南原理长度 500 mm，应用以上公式计算综合管廊的长度为：

$$L=2\times0.76\times600\ \text{mm}+500\ \text{mm}=1\ 412\ \text{mm}$$

由于振动台长 4 m，故取管廊计算长度为 1.5，此时模型箱纵向长度为 1.5 m。模型箱在振动台的布置见图 1。

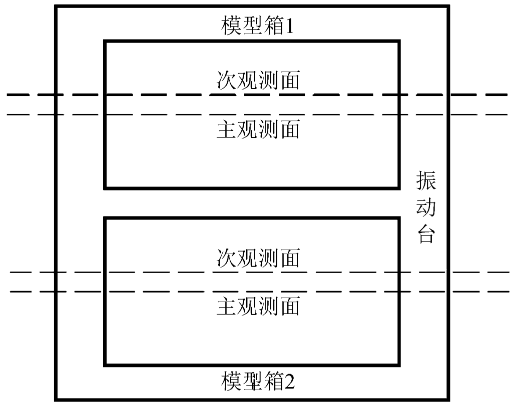

图 1　模型箱在振动台台面布置图

Fig.1　The layout of the model box at the shaking table

模型场地的高度在满足试验要求的情况下不宜过高，过高会使模型箱产生弯曲变形。史晓军[17]给出了模型场地最大高度 $H_{\max}$ 的计算公式为：

$$H_{\max}=\frac{c}{\rho(a_{\max}-g\tan\phi)}$$

在一般的场地条件下，由上式计算出来的模型场地最大高度为 2.5 m。在考虑试验要求的条件下，模型场地的高度初步取为 1.8 m。下面对于 1.8 m 的取值进行验证。由于本次设计中在振动台台面上对称布置了两个模型体系，在假设两个模型箱中单纯装有 1.8 m 高的土体时，此时振动台上面的重量达到最大值，最大值为：

$$M_{\max}=2\times\rho\times V=2\times1\ 800\ \text{kg/m}^3\times3\ \text{m}\times1.5\ \text{m}\times1.8\ \text{m}=29.16\ \text{t}$$

此时两个模型箱的最大总质量 $M_{\max}$ 小于振动台的容许质量 30 t，设计合理。

2.2　模型结构配筋

本试验中原型综合管廊配筋较为简单，模型结构配筋采用等面积配筋率原则。原型结构抗弯配筋率为：$\rho^1=\frac{A_s^1}{b^1h^1}$，抗剪配筋率为：$\rho_{sv}^1=\frac{A_{sv}^1}{b^1s^1}$。模型结构抗弯配筋率为：$\rho^2=\frac{A_s^2}{b^2h^2}$，抗剪配筋率为：$\rho_{sv}^2=\frac{A_{sv}^2}{b^2s^2}$。设计中使 $\rho^1=\rho^2$，$\rho_{sv}^1=\rho_{sv}^2$ 即可满足要求。

3　地震波的选择及加载制度

本试验中通过前期的二维有限元计算模拟，分析各种波下综合管廊的破坏特征及规律，选用 El-Centro 波、Kobe 波、Taft 波，其时程及傅氏谱见图 2。

试验采用分段加载的加载制度，具体加载方式及工况列于表 2。

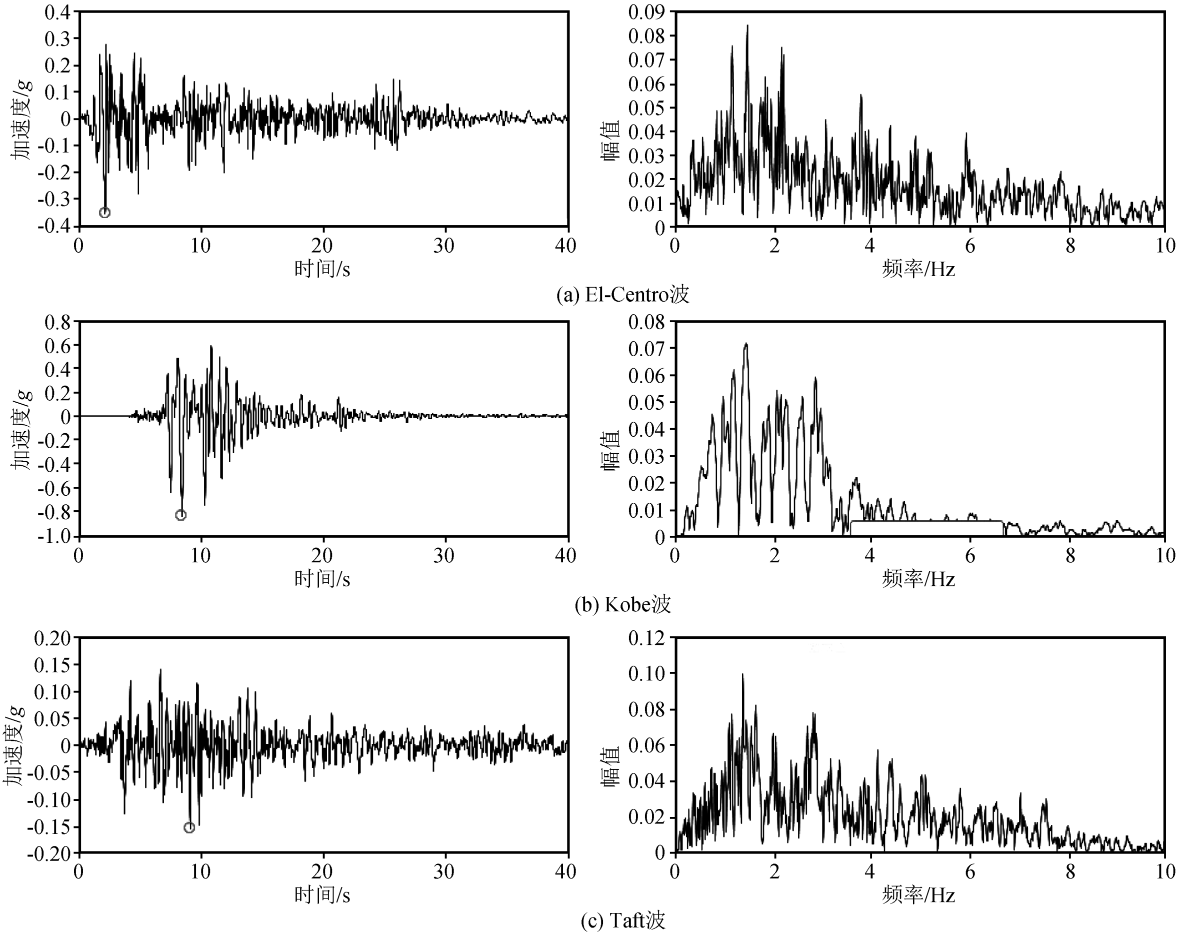

图 2 输入地震波的加速度时程曲线及傅氏谱曲线

Fig.2 Acceleration time history curve and Fourier spectrum curve of input seismic wave

表 2 试验工况及加载方式

Table 2 Test condition and loading system

编号	地震波	工况	峰值加速度/g	编号	地震波	工况	峰值加速度/g
1	白噪声	W1	0.05	14	El 波	E14	0.4
2	El 波	E2	0.05	15	Kobe 波	K15	0.4
3	Kobe 波	K3	0.05	16	Taft 波	T16	0.4
4	Taft 波	T4	0.05	17	白噪声	W17	0.05
5	白噪声	W5	0.05	18	El 波	E18	0.6
6	El 波	E6	0.1	19	Kobe 波	K19	0.6
7	Kobe 波	K7	0.1	20	Taft 波	T20	0.6
8	Taft 波	T8	0.1	21	白噪声	W21	0.05
9	白噪声	W9	0.05	22	El 波	E22	0.8
10	El 波	E10	0.2	23	Kobe 波	K23	0.8
11	Kobe 波	K11	0.2	24	Taft 波	T24	0.8
12	Taft 波	T12	0.2	25	Taft 波	T25	1.0
13	白噪声	W13	0.05	26	白噪声	W26	0.05

4 传感器的布置

本次试验设置 2 个观测断面，其中 1 个主观测面，1 个辅助观测面。按照前面试验目的及需要测量数据类型，所需的试验元件有：土体加速度计、结构加速度计、位移计、混凝土应变片、土压力计。

依据前期的文献调研以及二维简化数值计算结果，对于主、次断面的测试元件布置分别如图 3、4 所示。图中 A 为土体加速度计，AS 为结构加速度计，L 为位移计，P 为土压力盒，S 为混凝土应变片。以下对于图 3～图 6 的传感器布置目的进行简单说明：首先每个模型箱中的体系在纵向都设置了两个

观测面,其目的是在测量体系各种反应在纵向的空间效应。在模型体系横断面中布置的多列传感器用于测量模型体系地震反应的横向空间效应,多行传感器用于模型体系地震反应的竖向放大效应。

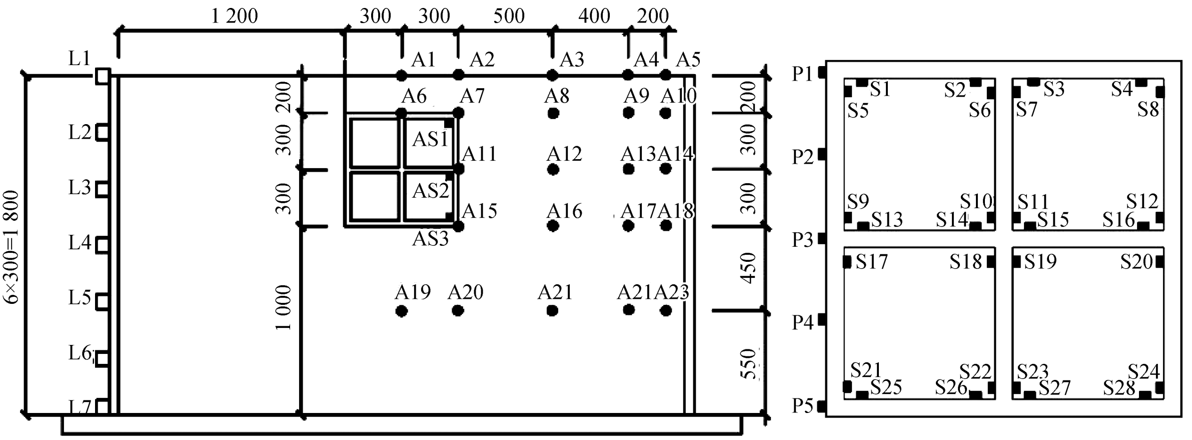

图 3　双层综合管廊主观测断面测试元件布置图

Fig.3　The layout of elements on subjective section for double deck utility tunnel

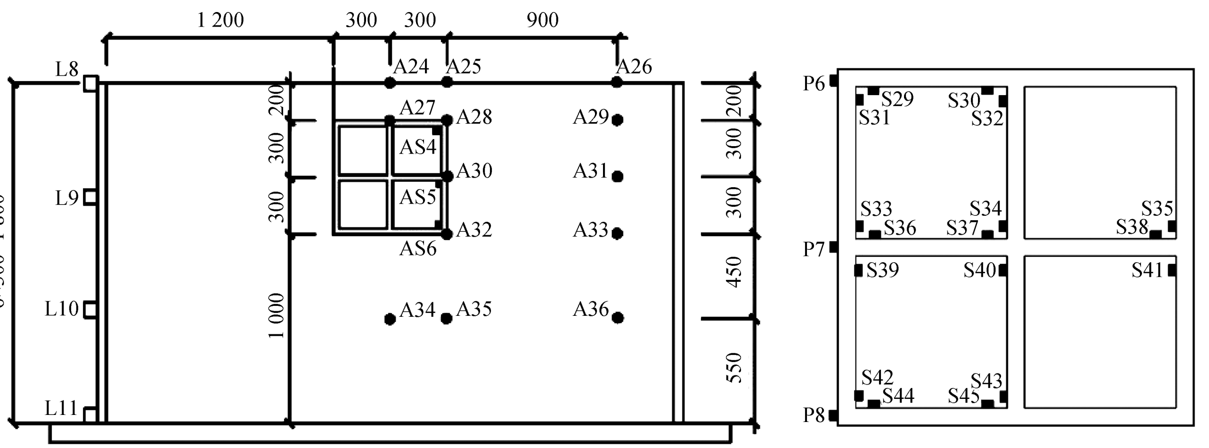

图 4　双层综合管廊次观测断面测试元件布置图

Fig.4　The layout of elements on auxiliary section for double deck utility tunnel

如图 3 中所示,双层综合管廊主观测面布置了 23 个土体加速度计(A1～A23),3 个结构加速度计(AS1～AS3),7 个位移计(L1～L7),5 个土压力盒(P1～P5),28 个混凝土应变片(S1～S28)。如图 4 中所示,双层综合管廊次观测面布置了 13 个土体加速度计(A24～A36),3 个结构加速度计(AS4～AS6),4 个位移计(L8～L11),3 个土压力盒(P6～P8),17 个混凝土应变片(S29～S43)。

在图 5 中单层综合管廊主观测面布置了 26 个土体加速度计(A1～A26),4 个结构加速度计(AS1～AS4),7 个位移计(L1～L7),3 个土压力盒(P1～P3),24 个混凝土应变片(S1～S24)。如图 6 中所示,单层综合管廊次观测面布置了 16 个土体加速度计(A27～A42),4 个结构加速度计(AS5～AS8),4 个位移计(L8～L11),3 个土压力盒(P4～P6),14 个混凝土应变片(S25～S38)。

5　结论

本文对于综合管廊横向振动台试验进行了详细设计,主要得到如下结论:

(1) 按照试验要求与目的对于试验设备及测试元件进行了比选。

(2) 按照 Bockingham π 相似理论,采取弹性模量、密度、加速度、长度这 4 个基本量来推导出其余量。同时按照相似设计原则确定了模型箱的纵向尺寸及高度。

(3) 对于模型的配筋设计进行比较介绍。

(4) 介绍了地震波的选择,通过前期综合管廊的二维数值模拟的反应结果,设计了详细的加载制度与工况。

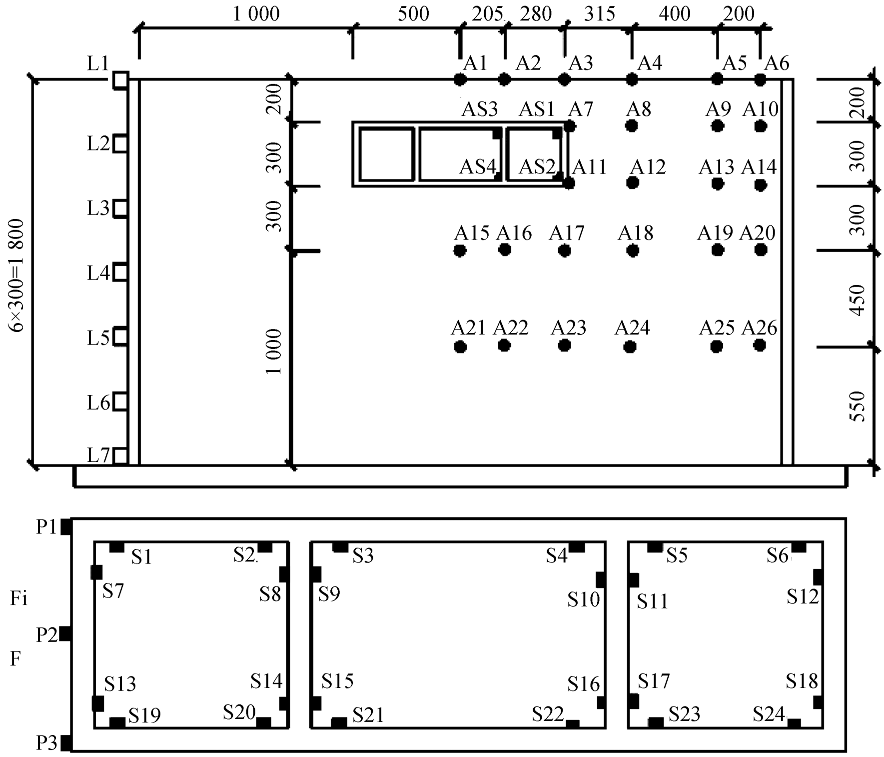

图 5　单层综合管廊主观测断面测试元件布置图

Fig.5　The layout of elements on subjective section for single deck utility tunnel

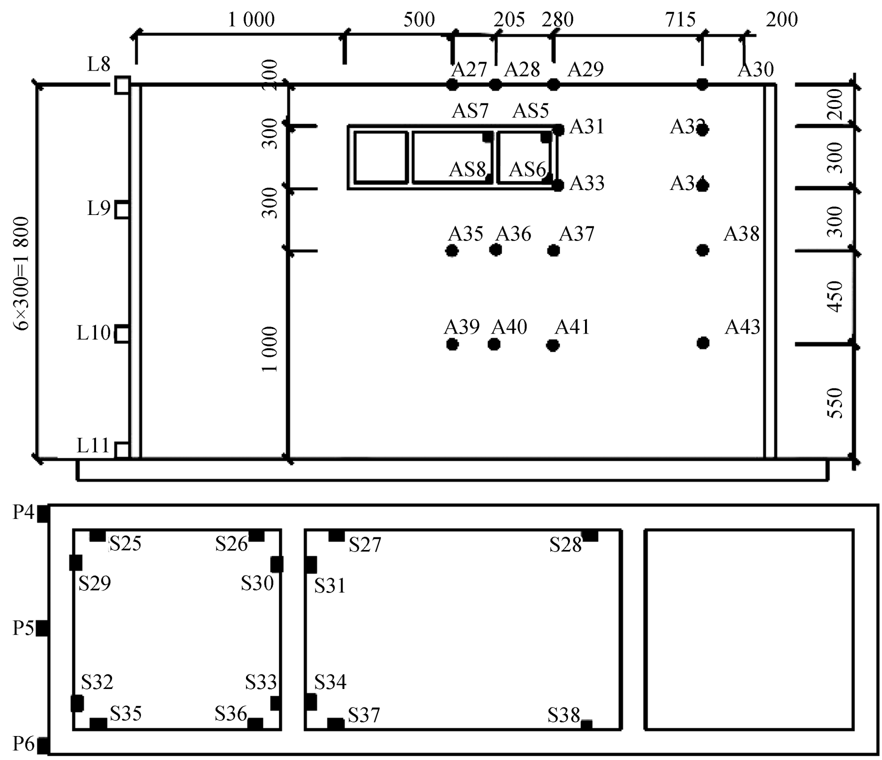

图 6　单层综合管廊次观测断面测试元件布置图

Fig.6　The layout of elements on auxiliary section for single deck utility tunnel

(5) 介绍了各个测试元件的布置原则,对于两种断面形式的综合管廊测试元件的布置进行了设计。

参考文献(References)

[1]　OKAMOTO S.Behaves of Submerged Tunnels during Earthquakes[C]//Proceedings of the 5th WCEE.1973:544-553.

[2] 季倩倩.地铁车站结构振动台模型试验研究[D].上海:同济大学,2002.
JI Qianqian.Shaking Table Model Test Study on Subway Station[D]..Shanghai:Tongji University,2002.

[3] 杨林德,季倩倩,郑永来,等.软土地铁车站结构的振动台模型试验[J].现代隧道技术,2003,40(1):7-11.
YANG Linde,JI Qianqian,ZHENG Yonglai,et al.Shaking Table Test on Metro Station Structures in Soft Soil[J].Modern Tunnelling Technology,2003,40(1):7-11.

[4] 杨林德,杨超,季倩倩,等.地铁车站的振动台试验与地震响应的计算方法[J].同济大学学报(自然科学版),2003,31(10):1135-1140.
YANG Linde,YANG Chao,JI Qianqian,et al.Shaking Table Test and Numerical Calculation on Subway Station Structures in Soft Soil[J].Journal of Tongji University(Natural Science),2003,31(10):1135-1140.

[5] 杨林德,季倩倩,郑永来,等.地铁车站结构振动台试验中模型箱设计的研究[J].岩土工程学报,2004,26(1):75-78.
YANG Linde,JI Qianqian,ZHENG Yonglai,et al.Study on Design of Test Box in Shaking Table Test for Subway Station Structure in Soft Soil[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2004,26(1):75-78.

[6] 庄海洋.土—地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D].南京:南京工业大学,2006.
ZHUANG Haiyang.Study on Nonlinear Dynamic Soil-Underground Structure Interaction and Its Large-Size Shaking Table Test[D].Nanjing:Nanjing University of Technology,2006.

[7] 陈国兴,庄海洋,杜修力,等.土-地铁车站结构动力相互作用大型振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2007,27(2):171-176.
CHEN Guoxing,ZHUANG Haiyang,DU Xiuli,et al.Analysis of Large-Scale Shaking Table Test of Dynamic Soil-Subway Station Interaction[J].Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2007,27(2):171-176.

[8] 车爱兰,岩檜敞广,葛修润.关于地铁地震响应的模型振动试验及数值分析[J].岩土力学,2006,27(8):1293-1298.
CHE Aiqan,IWATATE Takahiro,GE Xiurun.Dynamic Behaviors of Subway Structure Subjected to Strong Earthquake Motions Using Shaking Table Tests and Dynamic Analyses[J].Rock and Soil Mechanics,2006,27(8):1293-1298.

[9] 权登州,王毅红,马蓬渤,等.黄土地区地铁车站地震反应的频域分析及空间效应[J].振动与冲击,2016,35(21):102-112.
QUAN Dengzhou,WANG Yihong,MA Pengbo,et al.Spatial Effects and Frequency Domain Analysis for Seismic Responses of Subway Station in Loess Area[J].Journal of Vibration and Shock,2016,35(21):102-112.

[10] 权登州.黄土地区地铁车站地震反应特征与抗震计算方法研究[D].西安:长安大学,2016.
QUAN Dengzhou.Seismic Response Characteristic and Calculation Method of Subway Station in Loess[D].Xi'an:Changan University,2016.

[11] 马玉杰.邻近地裂缝带地铁隧道的地震响应研究[D].西安:长安大学,2017.
MA Yujie.Study on Seismic Response of Metro Tunnel Adjacent to Ground Fissure Zone[D].Xi'an:Changan University,2017.

[12] 邹炎.地下结构地震反应规律和抗震设计方法研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2015.
ZOU Yan.Study on Seismic Response Laws and Seismic Design Methods of Underground Structures[D].Haerbin:Institute of Engineering Mechanics,China Earthquake Administration,2015.,2015.

[13] 谌凯.基于振动台模型试验的地铁车站结构地震反应研究[D].福建:福州大学,2014.
CHEN Kai.Research on the Seismic Responses of Subway Station Based on Shaking Table Tests[D].Fujian:Fuzhou University,2014.

[14] 朱言灯.土—地下结构地震动力响应分析及不同场地条件的影响[D].广州:广州大学,2013.
ZHU Yandeng.Earthquake Dynamic Response Analyses of Soil-Underground Structure and Influence of Different Site Conditions[D].Guangzhou:Guangzhou University,2013.

[15] 岳庆霞.地下综合管廊地震反应分析与抗震可靠性研究[D].上海:同济大学,2007.
YUE Qingxia.Seismic Response Analysis and Reliability of Utility Tunnel[D].Shanghai:Tongji University,2007.

[16] 李杰,岳庆霞,陈隽.地下综合管廊结构振动台模型试验与有限元分析研究[J].地震工程与工程振动,2009,29(4):41-45.
LI Jie,YUE Qingxia,CHEN Jun.Research on Shaking-Talbe Test and Finite Element Numerical Simulation of Utility Tunnel[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2009,29(4):41-45.

[17] 史晓军.非一致地震激励地下综合管廊大型振动台试验研究[D].上海:同济大学,2008.
SHI Xiaojun.Shaking Table Test of Utility Tunnel with Non-uniform Seismic Excitation[D].Shanghai:Tongji university,2008.

[18] CHENJ,JIANG L Z,LI J,et al.Numerical Simulation of Shaking Table Test on Utility Tunnel under Non-Uniform Earthquake Excitation[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2012,30:205-216.

[19] CHENJ,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.