

DOI: 10.11779/CJGE201804007

沉管隧道-接头-场地土振动台试验研究

陈红娟¹, 闫维明², 陈适才², 张学明²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为了解沉管隧道及其接头在地震作用下的动力响应, 以中国广州洲头咀沉管隧道工程为背景, 在北京工业大学九子振动台阵系统上开展了 1:60 比例尺大型沉管隧道-接头-场地土振动台模型试验。试验中模型箱采用装配式连续体刚性模型箱, 其尺寸为 7.7 m (长) × 3.2 m (宽) × 1.2 m (高), 试验中输入地震动时程采用 El Centro、Taft、天津及广州人工地震记录, 输入方向为水平横向和水平纵向一致地震动激励。设计了用于模拟沉管隧道接头的构件, 并利用拉压传感器和激光位移计测得接头处所受轴向力及变形。结果表明: 不同段模型结构测得的加速度及其傅立叶幅值谱有差别, 且隧道结构地震响应不是随其自身特性振动, 而是服从于周围土体的地震响应; 不同强度地震动激励下, 不同接头的受力情况可以为沉管隧道的抗震设计提供有价值的参考; 不同强度地震激励下, 不同接头的位移变化趋势基本上遵循 J1 接头位移最大, J3 接头位移次之, J2 接头位移最小, 由于 J2 接头位于中间, 这样的变化规律使得整个隧道沿纵向变形更加协调; 水平纵向和水平横向一致地震激励下, 每个接头的正反方向位移变化趋势基本平行, 本次试验结果换算到原型结构, 隧道接头止水带处于安全范围不会漏水。

关键词: 沉管隧道; 接头; 振动台试验; 动力响应; 一致地震动激励

中图分类号: TU354 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)04-0634-11

作者简介: 陈红娟(1982-), 女, 博士后, 副研究员, 主要从事土动力学与地下结构抗震研究。E-mail: chenyu94@163.com。

Shaking table tests on immersed tunnel-joint-soil

CHEN Hong-juan¹, YAN Wei-ming², CHEN Shi-cai², ZHANG Xue-ming²

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 2. Beijing Key Laboratory of Earthquake

Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To obtain the dynamic response of the immersed tunnel and its joints under seismic action, with Zhoutouzui immersed tunnel project in China as the background, a series of shaking table tests on immersed tunnel-joint-soil with a scaling factor of 1/60 are conducted under uniform earthquake excitation by using the multiple shaking table test system in Beijing University of Technology. They are performed using a rigid prefabricated continuous model box with the dimensions of 7.7 meters long, 3.2 meters wide and 1.2 meters high. The test system is subjected to strong ground motions from El Centro record, Taft record, Tianjin record and Guangzhou artificial record through horizontal longitudinal and horizontal transverse uniform seismic excitations. The model tunnel joint components are designed to simulate the immersed tunnel joint, and the axial force and deformation of joints are obtained by using the pull-press sensors and laser displacement sensors. The test results show that the acceleration time histories and their Fourier spectra of different model tunnel segments are different from each other. And the seismic response of the tunnel structure is not vibration along with its own features, but is subject to the seismic response of the surrounding soils. Under the seismic excitation with different intensities, the force distribution of joints can provide valuable reference for aseismic design of the immersed tunnels. Under different seismic inputs with different intensities, the displacement of joint 1 is the maximum, and that of joint 2 is the minimum. Such change law makes the whole tunnel along the longitudinal deformation more harmonious. The change trend of displacements along the positive and negative directions at each joint is basically parallel. The practical water stop of tunnels is in a safe range and will not leak by converting the test results to the prototype data.

Key words: immersed tunnel; joint; shaking table test; dynamic response; uniform seismic excitation

0 引言

模型试验是进行工程结构抗震研究的有效手段, 其主要有振动台试验和离心机试验。离心机试验模型

基金项目: 国家自然科学基金项目(51708519); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务专项项目(DQJB18B15); 北京市自然科学基金项目(8164067)

收稿日期: 2017-01-03

*通讯作者 (E-mail: yanwm@bjut.edu.cn)

尺寸较小, 试验结果易受边界效应的影响。振动台试验技术比较成熟, 具有尺寸大、可重复性等优势。只要采用合适的相似律, 就能够得到较好的试验结果, 是研究地震作用下地下结构动力问题的重要手段^[1]。

沉管隧道是将若干预制的管节分别浮运到现场, 一节接一节地沉放安装, 并在水下将其互相连接而成^[2]。自1910年, 世界上首条沉管隧道——跨越美国与加拿大之间的底特律河铁路隧道的修建完成, 到现在已经有100多年的历史了。沉管隧道对工程地质、施工条件等要求宽松, 具有断面形状优异, 施工安全, 防水性好等优点^[3]。一经使用, 就得到迅速的发展。到目前为止, 世界各国已建成的沉管隧道超过130座^[4-5]。中国的第一条沉管隧道是于1972年建成的香港红磡海底隧道。目前, 香港建成5座, 台湾高雄1座, 中国大陆建成9座, 在建的有3座。举世瞩目的港珠澳大桥工程包括5664 m沉管隧道, 是目前世界唯一的深埋大回淤节段式沉管工程, 建成后将是世界上最长的公路沉管工程, 这标志着中国深海隧道安装达到一个新的高度^[6-7]。中国修建沉管隧道起步虽晚, 但是发展迅速。

Okamoto等^[8]进行了1/250小比例尺沉管隧道模型试验, 分别采用明胶、硅橡胶材料来制作土和隧道模型, 根据试验结果并结合实测数据, 提出了著名的多质点体系模型, 从而为抗震设计与研究提供了依据, 但是此试验没有考虑沉管隧道接头的影响。而沉管隧道是由若干节管段依次连接而成, 连接部位的接头是沉管隧道防水、受力的薄弱环节, 是沉管隧道工程的重中之重。沉管隧道接头设计、各部件配置是否合理、接头施工质量能否达到要求关系到沉管隧道的成败。

目前对于沉管隧道的抗震研究, 主要采用等效质点模型进行的理论分析与有限元三维实体建模。严松宏等^[9]采用田村重四郎和冈本舜三提出的沉埋隧道地震响应分析的数学模型, 对南京长江越江隧道沉管段进行了地震响应的纵向受力分析; 傅继阳等^[10]采用弹性地基梁理论计算了广州洲头咀沉管隧道的地震响应, 在假定管段接头为刚接、铰接和半刚接3种工况下, 计算了隧道在纵向和横向振动时的轴力、剪力和弯矩时程。Ding等^[11]采用全三维非线性建模方法建立了上海某沉管隧道总体有限元模型, 采用超级计算机的并行区域分解算法, 通过对沉管隧道总体模型合理分区来进行地震响应分析; Anastopoulos^[12]采用梁-弹簧模型对深水条件下沉管隧道的非线性抗震进行了分析; Lyngs^[13]采用不同的方式进行建模来探讨沉管隧道抗震设计中的模型精度问题; Oorsouw^[14]研究了

地震作用下隧道采用不同接头形式时接头部位的力学性能和变形特点; 白龙等^[15]采用ABAQUS有限元软件对港珠澳大桥工程中的沉管隧道建立三维有限元模型, 对其进行动力计算; 刘鸿哲等^[6]采用动力Winkler地基梁频域分析方法对港珠澳大桥海底沉管隧道工程进行了纵向地震响应计算; 楼梦麟等^[16]重点讨论沉管隧道地震反应分析中建立局部三维精细化模型时所应关注的几个问题。

鉴于沉管隧道的大量修建及其抗震研究不足的现状, 尤其是缺乏关于沉管隧道接头的振动台试验研究, 本文以广州洲头咀沉管隧道工程为背景, 开展了沉管隧道及其接头大型振动台模型试验, 以期为洲头咀隧道工程的抗震验算提供强有力的技术支持, 为我国沉管隧道抗震规范的制定提供理论和试验依据, 并为建立分析理论和设计方法, 以及了解水下隧道结构的可能破坏方式积累资料。

1 振动台试验设计

振动台试验是在北京工业大学模拟地震振动台阵系统上进行, 一共有9个子台, 每个振动台子台台面尺寸为1 m×1 m, 单台设计载重5 t, 水平向最大位移为±7.5 cm, Z向为±5 cm, 最大速度为60 cm/s, 最大加速度(满荷): X, Y向为1.5g, Z向为0.8g, 工作频率范围: 0.1~45 Hz, 该系统可实现两水平向和竖向切换的多种组合方式。

试验准备主要包括模型相似设计, 模型土的设计及制备, 隧道及接头模型的制作, 传感器的布置, 试验加载方案设计。

1.1 模型相似设计

本文以广州洲头咀沉管隧道工程为背景, 选取总长340 m的四节沉管隧道段为参考模型, 按照1/60的几何相似比对振动台试验模型进行设计。采用忽略重力模型, 即忽略 $S_g=1$ 的相似要求, S_E , S_l 和 S_p 可以自由独立选取。结合振动台阵试验的现场条件, 将沉管隧道试验模型的尺寸相似比取为1/60, 试验所采用的动力相似系数见表1。

1.2 模型土的设计及制备

在地基-结构相互作用体系振动台试验相似关系处理中, 应使地基-结构遵循相同的相似比关系。目前, 地下结构振动台模型试验大都只对模型结构进行相似模拟, 而地基土直接采用原型土。这种模型试验, 结构的刚度、质量等特性按照相似准则进行了折减, 而地基土并没有折减, 使得模型试验中土与结构的刚度比与原型中土与结构的刚度比并不一致, 那么由模型试验得出的土-结构动力相互作用规律势必与原型土-

结构动力体系有较大的差异,甚至得出错误的结论。本次试验基于结构与地基土相似设计相匹配的原则,通过采用卓越周期相似关系来简化设计模型土,通过将原型土中掺加锯末来降低刚质比,模型土的详细设计参见文献[17],模型箱的“边界效应”及自由场地基的动力特性及其变化规律详见文献[18]。

表 1 模型结构及模型土的相似比

Table 1 Similitude ratios of model structures and soils

物理量	相似关系	隧道模型	模型土
长度 l [L]		$S_L = 1/60$	$S_L = 1/60$
线位移 δ [L]		$S_\delta = S_L = 1/60$	$S_\delta = S_L = 1/60$
弹性模量 E [FL ⁻²]		$S_E = 1/4$	$S_E = 1/12.4$
密度 ρ [FL ⁻⁴ T ²]		$S_\rho = 1$	$S_\rho = 0.65$
等效质量 $[FL^4T^2]$		$S_{\rho_e} = 2$	$S_{\rho_e} = 0.65$
密度 ρ_e			
时间 t [T]		$S_T = S_L \sqrt{S_{\rho_e} / S_E} = 0.047$	$S_T = 0.047$
自振频率 ω [T ⁻¹]		$S_\omega = 1 / S_T = 21.28$	$S_\omega = 1 / S_T = 21.28$
加速度幅值 a [LT ⁻²]		$S_a = S_E / (S_L S_{\rho_e}) = 7.5$	$S_a = S_E / (S_L S_{\rho_e}) = 7.5$

由试验确定模型土的配合比为锯末: 原型土: 水=1:3:2.7, 按照此配合比进行现场配制, 模型土的装填密度控制在1.32 t/m³。将黏土、锯末、水按比例称重, 均匀拌合, 模型土拌制完成后迅速装箱, 并每10 cm进行一次夯实, 装完之后顶层覆盖塑料薄膜来防止水分蒸发, 并放配重块进行静压。装填好的模型土, 如图1所示。原型隧道上覆土厚度为2.29 m, 水深6 m, 水密度为1 g/cm³, 土密度为2.04 g/cm³, 将水深折算成土深为3 m, 根据相似比1/60, 最终确定试验中模型隧道上覆土的厚度为14 cm, 模型土高取0.8 m。



图 1 装填完成后的模型场地

Fig. 1 Completed model site

1.3 隧道模型的制作

隧道模型采用微粒混凝土制备, 配筋采用镀锌钢丝网, 通过试验制备的模型结构微粒混凝土配合比为水泥(425): 黄砂: 石灰: 水=1:6.0:0.6:0.5, 其弹性模量为7410 N/mm², 立方体抗压强度为5.679 N/mm², 密度与原型混凝土大致相同, 故密度相似比取为1, 弹性模量相似比为1/4。沉管隧道模型共4段, 其中两端的管节为变截面管段, 中间两段为等截面管段。每段隧道模型的详细加工尺寸如图2所示。

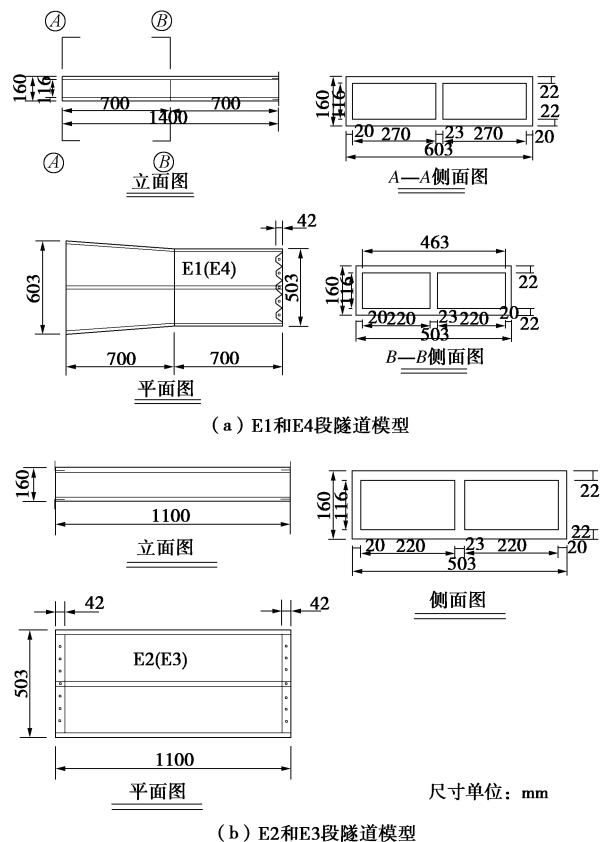


图 2 隧道模型加工详图

Fig. 2 Manuscript of model tunnel segments

由于模型整体尺寸较小, 在模型的制作过程中, 充分考虑制作条件的影响, 采用模板+钢丝网的制作工艺, 并在制作过程中布置带钩锯齿形角钢, 便于与模拟沉管隧道接头的钢圈焊接。隧道模型的具体制作过程为: ①制作侧板和底板的模板; ②安装模型钢丝网; ③绑扎底部带钩锯齿形角钢的带钩钢筋; ④浇筑侧板、中柱和底板并抹平; ⑤顶板支模; ⑥绑扎顶部带钩锯齿形角钢的带钩钢筋; ⑦浇筑顶板; ⑧养护。隧道模型的加工过程如图3所示。

1.4 隧道接头模型的制作

沉管隧道水下共4段, 管段之间共有3个接头。接头通过止水带以及预拉索提供轴向刚度, 38套预拉索总拉伸刚度约为83406.2 kN/m, 止水带通过有限元

模拟结果可知其压缩刚度可以简化为双线性模型(如图4所示), 并且, 由于初始压缩量为50 mm, 所以接头轴向压缩刚度主要为止水带压缩刚度, 接头拉伸刚度主要为预拉索拉伸刚度(如图4(c)所示)。试验模型中为了方便止水带制作去掉尖头, 简化预压缩的影响。制作时, 隧道模型采用微粒混凝土, 接头处预埋角钢, 并与端钢壳焊接, 止水带简化为与隧道等截面, 厚度为2 cm的橡胶圈, 并与端钢壳黏接牢固。水平及垂直剪切键是厚度为2 mm的矩形环, 剪切键的一端与端钢壳焊接牢固, 另一端为自由端, 使其可以自由插入一个截面较大的矩形活动钢圈。预应力钢拉索简化为细螺杆, 如图5所示。在图5(c)中, 一端安装止水带, 并采用细螺杆施加预应力, 在吊装及隧道埋置过程中, 为防止隧道接头变形过大而先用粗螺杆固定, 在回填土之前将其拧松。另一端安装拉压力传感器来测量隧道的轴力, 每个接头安装4个, 均分布在上下端部。



图3 隧道模型制作过程

Fig. 3 Manufacturing process of model tunnel

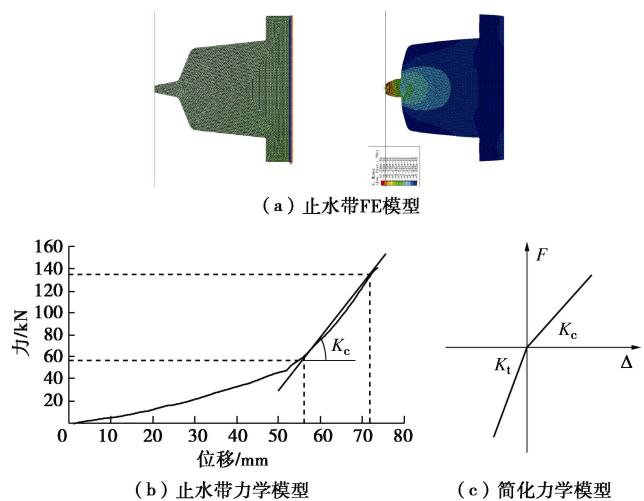
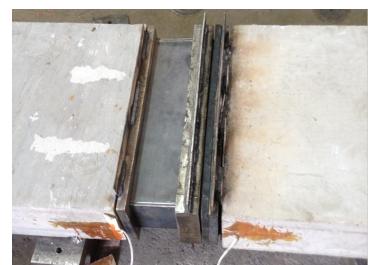


图4 接头简化模型

Fig. 4 Simplified joint model



(a) 橡胶止水带图



(b) 接头剪切键



(c) 接头整体图

图5 沉管隧道模型接头

Fig. 5 Joint model for immersed tunnel

1.5 传感器的布置

试验量测的数据主要有地基土及隧道模型的加速度反应、接头处的轴力、接头处的位移。所用传感器

有加速度传感器、拉压传感器、激光位移计。模型土体及模型结构的加速度传感器布置如图 6 所示(圆形、长方形分别代表 X 、 Y 向)。接头处力传感器编号及布置如图 7 所示。接头处激光位移计布置如图 8 所示, 在接头处一段隧道模型结构底部中间位置布置激光位移计如图 8 (a) 所示, 在相邻一段隧道模型结构底部中间位置布置薄木板作为信号接收端如图 8 (b) 所示。

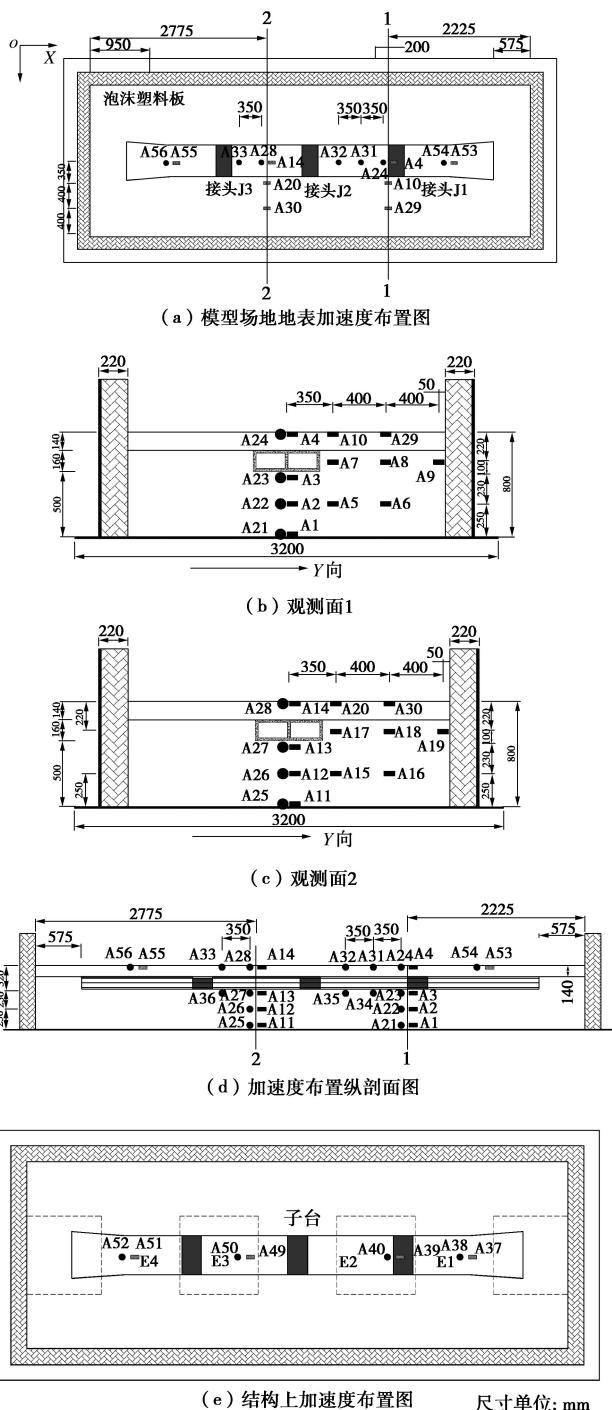


图 6 加速度传感器布置图

Fig. 6 Arrangement of acceleration sensors

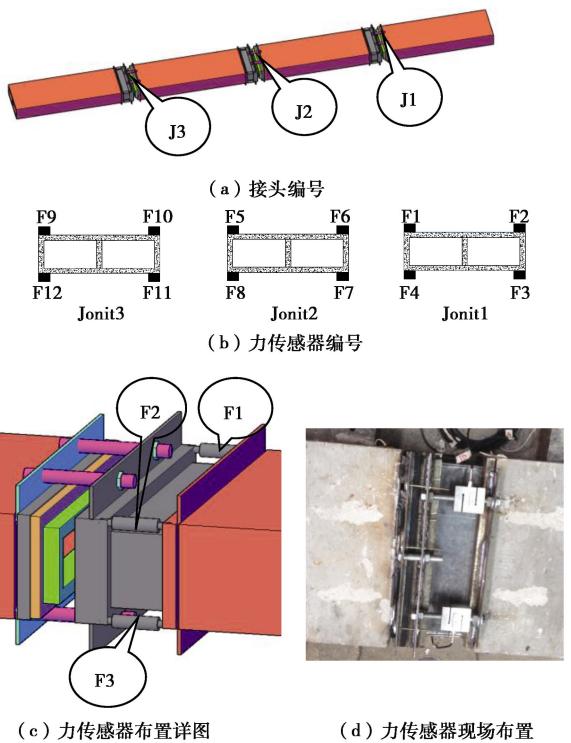


图 7 接头处力传感器布置图

Fig. 7 Arrangement of force sensors at joints



图 8 激光位移计现场布置图

Fig. 8 Arrangement of laser sensors

1.6 地震输入和试验加载方案

试验中, 地震动输入选取分别采集于 1940 年美国 Imperial 山谷地震的 El Centro 地震动记录, 1952 年 California Earthquake 地震的 Taft 地震动记录, 1976 年天津地震中在天津医院记录的一南北向地震记录以及一条人工合成地震动记录。输入地震动加速度时程曲线及其傅氏谱见图 9 所示。

根据《建筑抗震设计规范》中对小震、中震、大震地震动设计峰值的规定, 广州洲头咀隧道工程地处 7 度区, 加速度峰值分别为 $0.035g$, $0.10g$ 和 $0.22g$, 其中 g 为重力加速度。按 7 度抗震设防烈度考虑, 结合本试验, 首先根据相似比进行相应的调幅和调频, 调幅后对应的试验小、中、大震分别为 $0.2583g$, $0.738g$, $1.6236g$, 振动台最大输出加速度为 $1.5g$, 为考察模型土在加载逐渐增大过程中的变化以及防止结

构的突然破坏, 因此试验加载加速度从 $0.1g$, $0.25g$ 开始, 以 $0.25g$ 为步长, 逐渐加大到 $1.5g$, 每个工况加载之前, 扫描一下白噪声, 考察结构自振频率变化。地震动输入方向为水平纵向 (X 向) 和水平横向 (Y 向)。

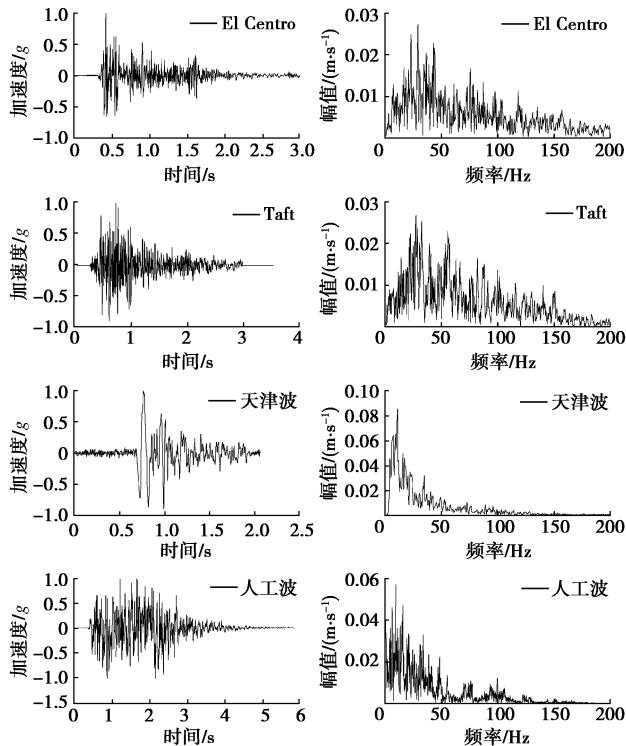


图9 地震动输入加速度时程及其傅立叶谱

Fig. 9 Time-histories of acceleration and FFTs

2 振动台试验结果与分析

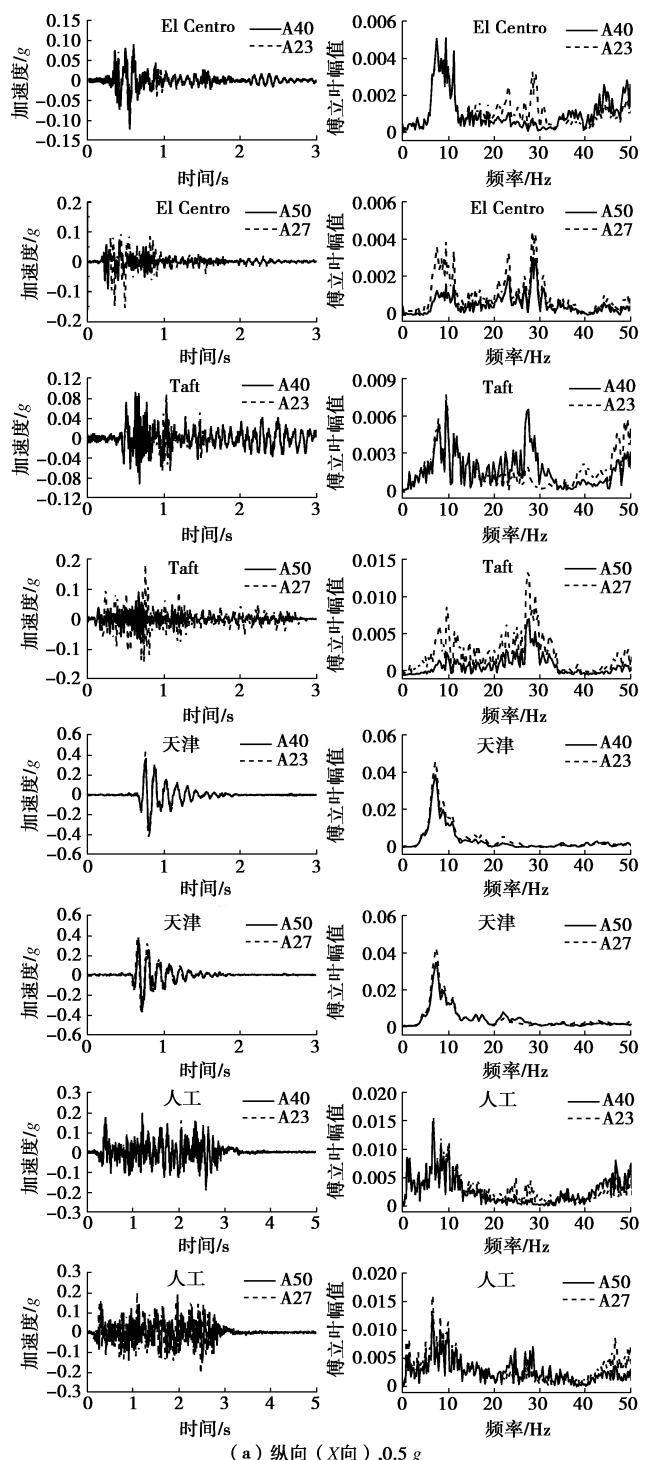
沉管隧道是一种长线型地下结构, 由于接头的存在, 不同段隧道结构在地震波传播作用下的响应可能会有变化。对开展的沉管隧道-接头-模型土在一致地震激励下的振动台试验结果进行分析, 得到一些有价值的结论。

2.1 结构和周围土体加速度反应

为了比较隧道模型结构和周围模型土体加速度响应之间的关系, 选取隧道模型结构E2段布置的加速度计A40 (A39) 与其附近同层模型土体中的加速度计A23 (A7) 的加速度响应进行比较; 选取隧道模型结构E3段布置的加速度计A50 (A49) 与其附近模型土体中的加速度计A27 (A17) 的加速度响应进行比较。鉴于篇幅所限, 选取El Centro、Taft、天津和广州人工地震动记录在输入地震动峰值为 $0.5g$ 下的工况进行研究。不同地震动输入下模型隧道结构及其周围模型土体测点的加速度时程和傅立叶幅值谱, 如图10所示。

由图10可以看出: ①结构加速度波形与土体的加速度波形吻合得很好, 说明结构和周围土体加速度响

应的相位基本同步, 但结构加速度幅值要小于周围附近土体的加速度幅值, 这与实际地震观测结果是一致的; ②结构和土体加速度的傅立叶幅值谱形状保持很好的相似性。上述现象说明, 由于受周围土体的约束, 地下结构的地震响应不是随其自身特性震动, 而是服从于周围土体的地震响应, 这与Shunzo Okamoto和Choshiro Tamura试验得出的结论一致^[8]; ③不同段模型结构测得的加速度及其傅立叶幅值谱有差别, 结构上加速度A50比A40的加速度峰值大, 且其傅氏谱频率要丰富。



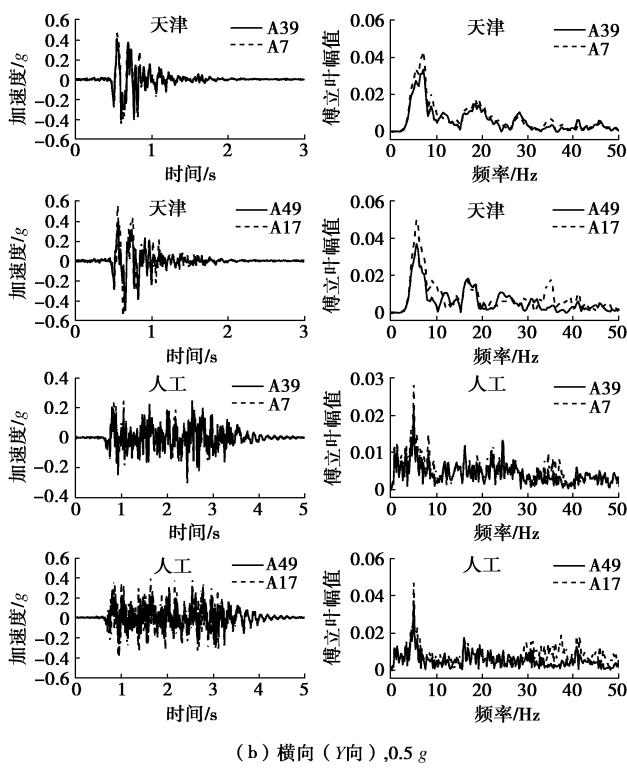


图 10 不同地震动激励下结构及土体加速度及其傅氏谱

Fig. 10 Accelerations and their FFTs of structures and soils under different seismic excitations

2.2 结构上加速度反应

在不同隧道模型结构段E1、E2、E3、E4上布置了X向/Y向加速度计A38(A37)、A40(A39)、A50(A49)、A52(A51)。限于篇幅, 只考察地震动输入强度0.25g, 0.75g和1.5g时Y向峰值加速度、地震输入强度0.75g时加速度时程及傅立叶幅值谱, 如图11, 12所示。

由图11可以看出: ①不同结构段上峰值加速度有差别, 随着输入强度的增大, 差别在逐渐增大; ②相同强度地震动输入下, 结构上峰值加速度值, $a_{\text{天津}} > a_{\text{人工}} > a_{\text{El Centro}} > a_{\text{Taft}}$ 。

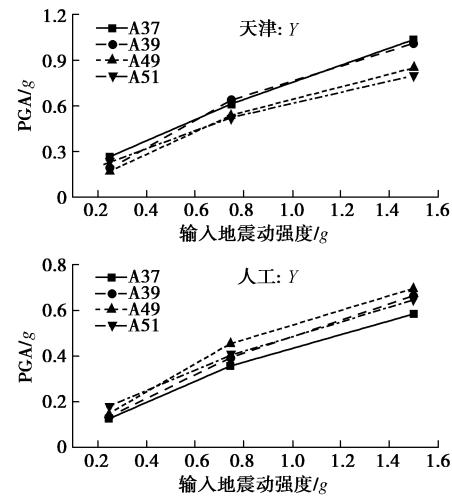
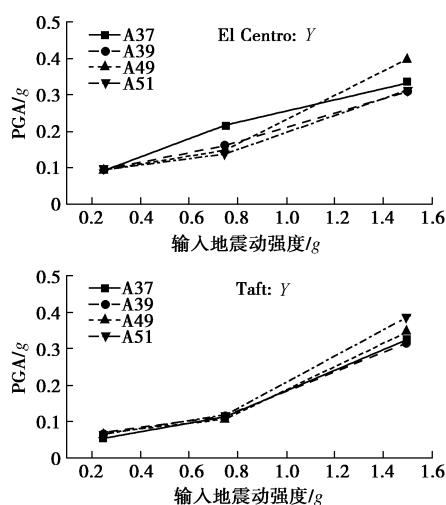


图 11 不同结构段上峰值加速度

Fig. 11 PGAs on structure

由图12可以看出: ①不同结构段上加速度波形吻合较好, 说明不同结构段加速度响应的相位基本同步; ②不同结构段上加速度的傅立叶幅值谱形状略有差别, 但差别不是很大。

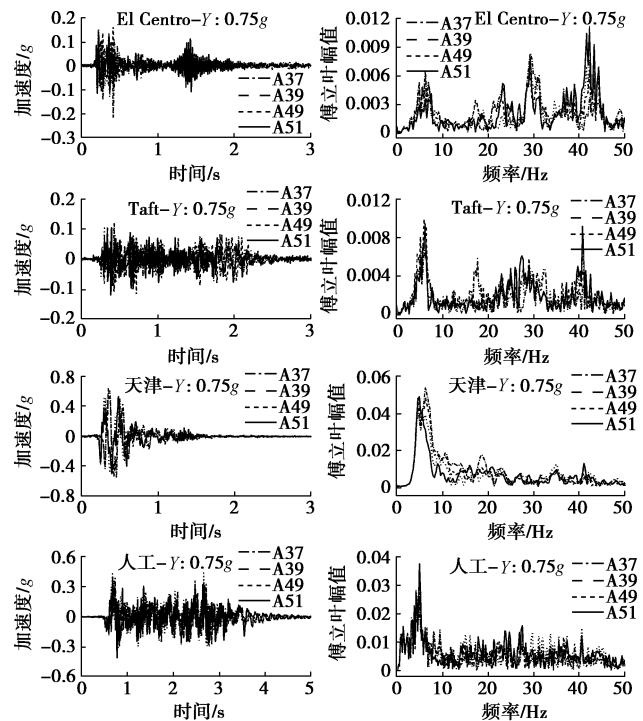


图 12 不同结构上加速度及其傅氏谱

Fig. 12 Accelerations and their FFTs on structures

2.3 接头处受力结果分析

在水平纵向及水平横向一致地震激励试验中, 利用布置的力传感器测得了接头处的轴向力幅值, 如图13所示。由图13可知: ①不同地震激励下, 接头处力传感器测得的力时程峰值变化拥有相似的变化规律。②随着输入强度的增加, 力峰值绝对值也随之增大。③每个力传感器测得的力时程峰值的正、反向峰值沿

零轴呈对称分布。④水平纵向同一强度地震输入下, 7号和9号力传感器测得的力时程峰值较其余力传感器测得的力时程峰值大, 4号、6号和8号力传感器测得的力时程峰值较其余力传感器测得的力时程峰值小; 7号和9号力传感器分别位于接头J2的底部右侧、接头J3的上部左侧, 4号、6号和8号力传感器分别位于接头J1的底部左侧、J2的上部右侧、接头J2的下部左侧, 这样的力分配, 更好的协调了沉管隧道3个接头的力分布, 更加合理。⑤水平横向同一强度地震输入下, 5号和10号力传感器测得的力时程峰值较其余力传感器测得的力时程峰值大, 4号和8号力传感器测得的力时程峰值较其余力传感器测得的力时程峰值小。⑥天津地震动激励下, 力传感器测得的力时程的峰值最大, 广州人工地震动激励下其值次之, El Centro、Taft地震动激励下其值较小。

将不同输入方向, 不同强度地震动激励下不同接头的受力最大及最小位置, 统计成表2, 此结果可以为沉管隧道的抗震设计提供有价值的参考, 在进行接头设计时, 需要重点考虑这些受力较大位置, 保证有足够的刚度和位移冗余度, 不致使其在地震作用下发生接头的破坏。

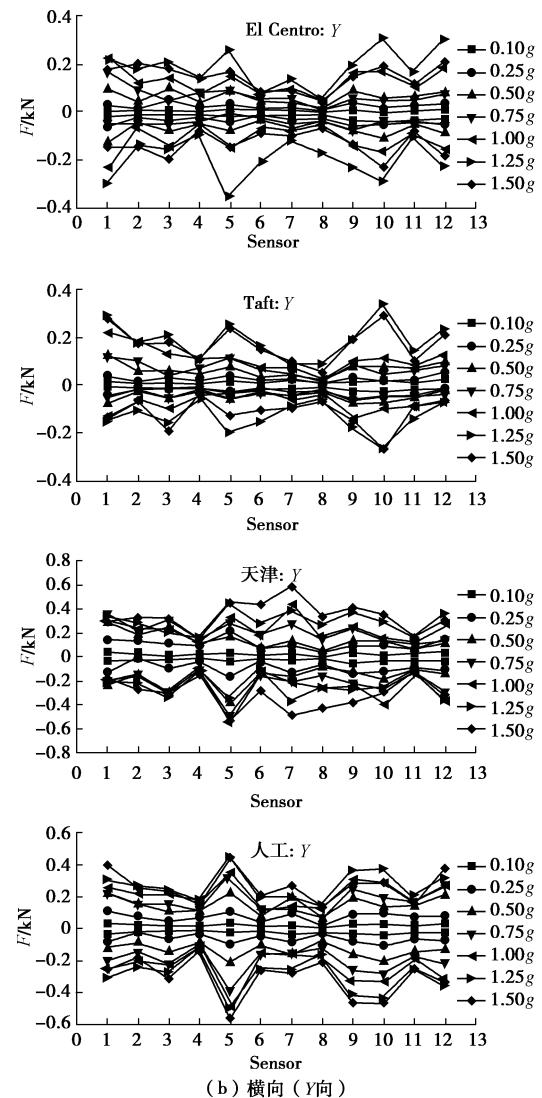
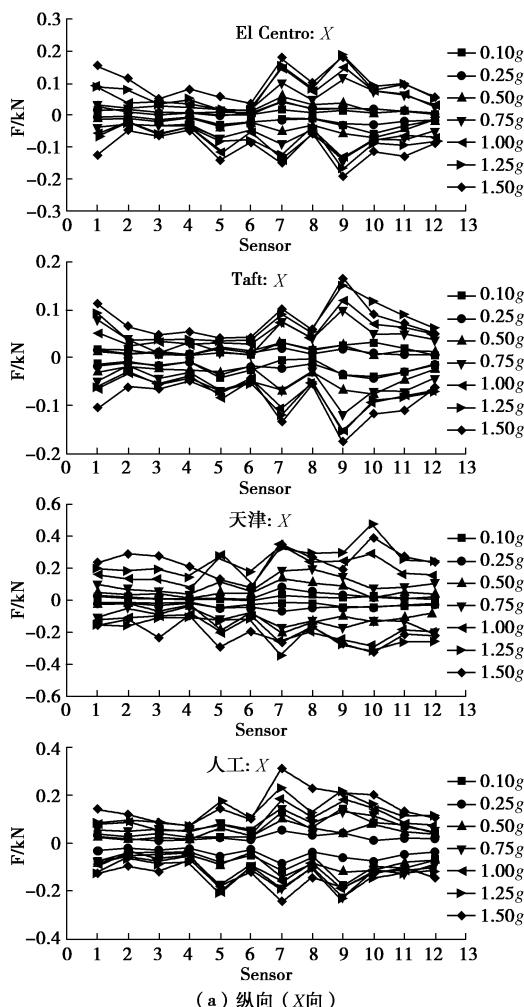


图13 不同地震激励下不同接头处轴向力峰值变化

Fig. 13 Peak values of force at different joints under different seismic excitations

表2 不同地震激励下较大和较小力所处位置

Table 2 Locations of larger and smaller forces under different seismic excitations

地震动	X		Y	
	较大力处	较小力处	较大力处	较小力处
El Centro	7, 9	4, 8	1, 5, 10	4, 8
Taft	7, 9	4, 8	5, 10	4, 8
天津	7, 10	4, 6	5, 7	4, 11
人工	7, 9	4, 6	5, 9, 10	4, 8

2.4 接头处位移结果分析

实际中的沉管隧道, 止水带在水压力作用下被预压缩, 地震作用会引起止水带出现连续的解压和重压缩过程, 通过初始压缩量和变形量的对比来判定隧道接头是否失效, 在模型试验中, 接头止水带模型比较小, 又无法提供实际工程那样的水压环境, 因此采用

拉索施加预拉力, 因预压缩量无法量测, 因此本文将初始量测位置定为零点位置。

试验中所使用的激光位移计的精度为 0.2%, 即土 0.02 mm 的偏差均在正常范围, 保证了试验所测位移的精度。水平纵向和水平横向地震激励试验中, 利用激光位移计测得了接头处的相对位移值, 由于 3 个接头处激光位移计激光发出端和信号接收端的距离不可能完全一致, 且由于模型土体的约束作用, 可能每次试验不可能恢复最初初始值, 所以, 统计的位移结果均为每次位移时程减去各自初始值得到的相对位移结果。不同强度地震激励下、不同接头的拉伸和压缩最值图, 如图 14 所示。

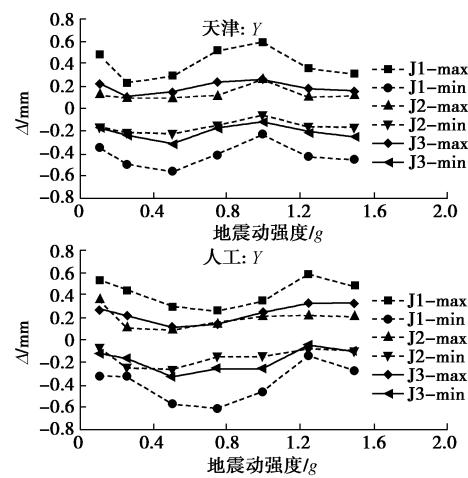
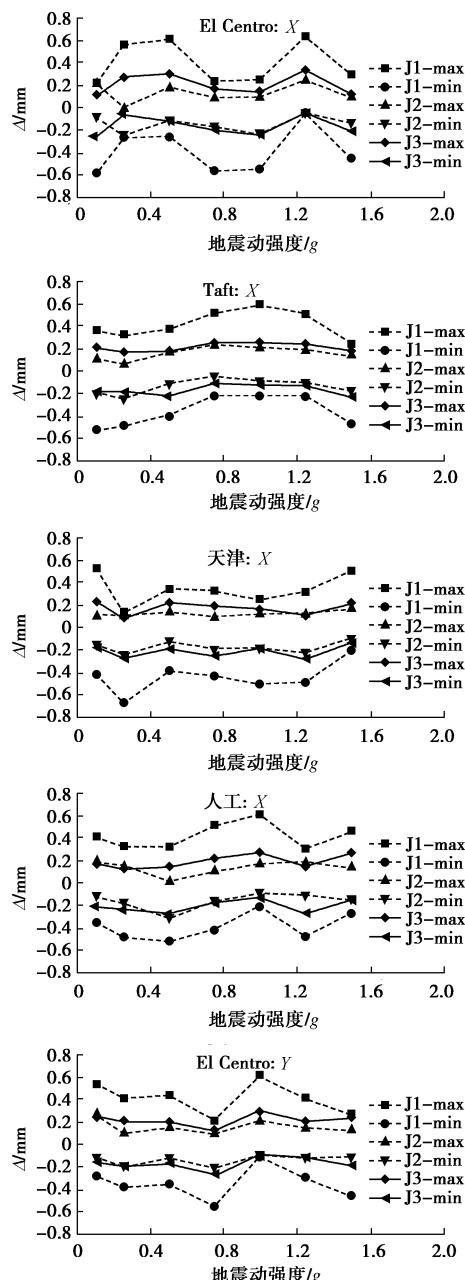


图 14 不同地震激励下不同接头处位移变化

Fig. 14 Displacements at different joints under seismic excitation

由图 14 可知: ①不同地震动激励下, 每个接头的正反方向位移变化趋势(即拉伸或压缩)基本平行; ②不同地震动、不同强度地震激励下, 不同接头的位移变化趋势基本上遵循 J1 接头位移最大, J3 接头位移次之, J2 接头位移最小, 由于 J2 接头位于中间, 这样的变化规律使得整个隧道沿纵向变形更加协调。在 El Centro、Taft、天津和广州人工地震动水平纵向和水平横向一致激励下, 接头变形最值分别为 0.63, 0.59, 0.66, 0.62 mm 和 0.61, 0.59, 0.59, 0.61 mm, 根据相似关系换算原型隧道接头最大拉伸位移分别为 37.8, 35.4, 39.6, 37.2 mm 和 36.6, 35.4, 35.4, 36.6 mm, 小于预压缩 50 mm, 因此接头止水带处于安全范围不会漏水。

3 结 论

以广州洲头咀沉管隧道工程为背景, 设计了一种用于模拟沉管隧道柔性接头的构件, 开展了沉管隧道—接头—场地土大型振动台试验, 通过布置的力传感器和激光位移计测得了模型接头处的轴向力和相对位移, 为沉管隧道抗震设计提供了第一手的试验资料, 未来可与工程现场实测数据结合, 为提出新的理论计算模型及验证方法提供依据。主要结论有:

(1) 隧道结构加速度波形与土体的加速度波形吻合得很好, 隧道结构和土体加速度的傅立叶幅值谱形状保持很好的相似性, 说明地下结构的地震响应不是随其自身特性震动, 而是服从于周围土体的地震响应, 这与 Shunzo Okamoto 和 Choshiro Tamura 试验得出的结论一致; 不同段模型结构测得的加速度及其傅立叶幅值谱有差别。

(2) 不同结构段上峰值加速度有差别, 随着输入强度的增大, 差别在逐渐增大; 不同结构段上加速度波形吻合较好, 说明不同结构段加速度响应的相位基本同步; 不同结构段上加速度傅立叶幅值谱形状略有差别。

(3) 不同强度地震动激励下, 不同接头的受力情况可以为沉管隧道的抗震设计提供有价值的参考, 在进行接头设计时, 需要重点考虑受力较大位置, 保证有足够的刚度和位移冗余度。

(4) 水平纵向和水平横向一致地震激励下, 每个接头的正反方向位移变化趋势基本平行; 不同地震动、不同强度地震激励下, 不同接头的位移变化趋势基本上遵循 J1 接头位移最大, J3 接头位移次之, J2 接头位移最小; 水平纵向和水平横向一致地震激励下, 根据相似关系换算到原型隧道接头最大位移分别为 39.6 mm 和 36.6 mm, 小于预压缩 50 mm, 因此接头止水带处于安全范围不会漏水。

参考文献:

- [1] 叶海林, 郑颖人, 杜修力, 等. 边坡动力破坏特征的振动台模型试验与数值分析[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(9): 128 – 135. (YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, DU Xiu-li, et al. Shaking table model test and numerical analysis on dynamic failure characteristics of slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(9): 128 – 135. (in Chinese))
- [2] 刘鹏, 丁文其, 杨波. 沉管隧道接头刚度模型研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(增刊 2): 133 – 139. (LIU Peng, DING Wen-qi, YANG Bo. Model for stiffness of joints of immersed tube tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(S2): 133 – 139. (in Chinese))
- [3] 黎伟, 房营光, 莫海鸿, 等. 砂流法施工致沉管隧道管段竖向位移的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(6): 1102 – 1108. (LI Wei, FANG Ying-guang, MO Hai-hong, et al. Vertical displacement of tube segment of immersed tunnels caused by sand flow construction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(6): 1102 – 1108. (in Chinese))
- [4] GLERUM A. Developments in immersed tunnelling in holland[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1995, **10**(4): 455 – 462.
- [5] GRANTZ W C. Steel-shell immersed tunnels-forty years of experience[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1997, **12**(1): 23 – 31.
- [6] 刘鸿哲, 黄茂松. 超长沉管隧道纵向地震响应频域分析方法[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 1971 – 1978. (LIU Hong-zhe, HUANG Mao-song. Frequency-domain analysis method for longitudinal seismic response of super-long immersed tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(11): 1971 – 1978. (in Chinese))
- [7] HU Zhi-nan, XIE Yong-li, WANG Jun. Challenges and strategies involved in designing and constructing a 6 km immersed tunnel: a case study of the Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **50**: 171 – 177.
- [8] OKAMOTO S, TAMURA C. Behaviour of subaqueous tunnels during earthquakes[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1973, **1**: 253 – 266.
- [9] 严松宏, 潘昌实. 沉管隧道地震响应分析[J]. 现代隧道技术, 2006, **43**(2): 15 – 21. (YAN Song-hong, PAN Chang-shi. Seismic response analyses of an immersed tube tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2006, **43**(2): 15 – 21. (in Chinese))
- [10] 傅继阳, 吴玖荣, 徐安. 广州洲头咀沉管隧道地震响应研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2008, **35**(9): 23 – 27. (FU Ji-yang, WU Jiu-rong, XU An. Seismic response of Zhoutouzui immersed tunnel in Guangzhou[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2008, **35**(9): 23 – 27. (in Chinese))
- [11] DING Jun-hong, JIN Xian-long, GUO Yi-zhi, et al. Numerical simulation for large-scale seismic response analysis of immersed tunnel[J]. Engineering and Structures, 2006, **28**: 1367 – 1377.
- [12] Anastasopoulos. Nonlinear response of deep immersed tunnel to strong seismic shaking[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**: 1067 – 1090.
- [13] LYNGS J H. Model accuracy in aseismic design of immersed tunnel[D]. Aalborg: Aalborg University, 2008.
- [14] VAN OORSOUW R S. Behaviour of segment joints in immersed tunnels under seismic loading[D]. Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [15] 白龙, 赵旭, 杜修力, 等. 沉管隧道接头地震动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, **35**(2): 153 – 159. (BAI Long, ZHAO Xu, DU Xiu-li, et al. Seismic response of joints of immersed tube tunnels[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation of Engineering, 2015, **35**(2): 153 – 159. (in Chinese))

- [16] 楼梦麟, 董 云, 张如林. 沉管隧道地震反应分析局部精细化建模中的几个问题[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(9): 1705 – 1712. (LOU Meng-lin, DONG Yun, ZHANG Ru-lin. Several problems in refined local modeling for seismic response analysis of immersed tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(9): 1705 – 1712. (in Chinese))
- [17] 陈红娟, 闫维明, 陈适才, 等. 小比例尺地下结构振动台试验模型土的设计与试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, **35**(3): 59 – 66. (CHEN Hong-juan, YAN Wei-ming, et al. Design and experimental

research on model soil used for shaking table test of a small scale underground structure[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, **35**(3): 59 – 66. (in Chinese))

- [18] 陈红娟, 李小军, 闫维明, 等. 锯末混合土地基自由场振动台模型试验[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(11): 2068 – 2077. (CHEN Hong-juan, LI Xiao-jun, YAN Wei-ming, et al. Study on shaking table test of sawdust mixed clay site model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(11): 2068 – 2077. (in Chinese))

2018 年全国工程地质学术年会 (第 1 号通知 征集论文)

会议简介: 2018 年全国工程地质学术年会将于 2018 年 10 月 12 日~16 日在陕西西安市召开。全国各地及国际特邀工程地质专家学者将欢聚一堂, 围绕国家“一带一路”与生态环境协调发展理念, 对我国重大工程建设涉及的城市、交通、能源、水利、海洋等重大工程地质问题, 新时代工程地质新理论、新技术以及重大工程案例进行研讨, 为我国“一带一路”国家战略和生态文明美丽中国献计献策。我们热忱邀请各位代表莅临魅力古城西安参加本次学术盛会。

主办单位: 中国地质学会。

承办单位: 长安大学; 中国地质学会工程地质专业委员会。

会议主题及议题: “一带一路”与生态环境——新时代工程地质理论与实践。①新时代工程地质理论; ②一带一路重大工程地质问题; ③一带一路沿线地质灾害防控; ④黄土高原生态环境; ⑤交通建设与工程地质; ⑥城市地质与地下空间开发利用; ⑦工程地质新技术新方法。

会议时间安排: 2018 年 10 月 12~16 日。

会议论文征集: 论文题目请根据大会主题和议题自由选定。会议论文应为未正式发表过的最新成果, 篇幅尽量控制在 6 页以内。部分论文择优在《工程地质学报》、《地球科学与环

境学报》和《长安大学学报》(自然科学版)正刊发表, 其余论文经评审后在《工程地质学报》增刊发表。论文格式请严格按《工程地质学报》编排格式编排, 具体见网站: <http://www.gcdz.cn>。论文请通过电子邮件发送到: gcdz@mail.igcas.ac.cn, 邮件主题请注明“2018 年全国工程地质学术年会投稿”。论文摘要截止时间: 2018 年 4 月 15 日; 论文全文截止时间: 2018 年 5 月 31 日; 联系地址: 100029 北京朝阳区北土城西路十九号《工程地质学报》郭静芸收; 联系电话 / 传真: 010-82998124。

会议费用: ①会议代表注册费 1200 元 / 人, 在校学生及陪同代表 600 元 / 人; ②会议期间交通及食宿费用自理。

大会秘书处: 吕艳 15829299867, 杨友健 13636808212, 邓龙胜 13571857487, 祝艳波 18291971798, 朱兴华 15891391126, 黄伟亮 13379258205, 地址: 西安市雁塔路 126 号长安大学地质工程与测绘学院(工程地质学术年会会务组)。

展板招租联系人: 邓龙胜, 13571857487, 邮编: 710054, 联系电话: 029-82339021, 电子邮箱: xian2018gcdznh@163.com, 传真: 029-82339021。

(大会组委会 供稿)