

明-暗挖地铁车站框架结构接头刚度对抗震性能的影响研究*

袁勇^{1,2} 蓝旭翌¹ 徐正良³ 毕湘利⁴ 李 翀¹

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

3. 上海市城市建设设计研究总院, 200125, 上海; 4. 上海申通地铁集团有限公司, 201103, 上海//第一作者, 教授)

摘 要 上海轨道交通 14 号线静安寺站位于城市核心区, 受限于周边运营设施与建筑保护需求, 采用顶管结构衔接两侧明挖法框架结构式车站。该复合工法建设的车站结构存在刚度差异大, 衔接方式对地震效应的影响未知等技术难题。为此开展了几何比尺 1/20 的结构振动台试验, 研究该车站的抗震性能。试验结果表明: 车站顶管与框架结构之间采用柔性连接时, 地震波沿车站横向输入时顶管加速度峰值比纵向输入时大, 框架结构质量较大的一端顶管加速度峰值较大; 采用刚性连接时环缝张开量整体大于采用柔性连接的工况。已有理论分析较适用于柔性连接工况, 当最大环缝张开量较小时, 试验值相对理论值偏小。

关键词 地铁; 车站; 组合工法; 结构抗震; 振动台

中图分类号 U442.5*5:U231.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.08.039

Influence of Open-buried Excavation Metro Station Joint Stiffness on Seismic Performance

YUAN Yong, LAN Xuzhao, XU Zhenliang, BI Xiangli, LI Chong

Abstract Jing'an Temple Station of Shanghai Metro Line 14 is located in urban core area. Due to the restriction of surrounding operating facilities and the demand for building protection, the station adopts a combined structure in which the pipe-jacking structures are connected to the cut-and-cover frame structures on both sides. However, the station structure constructed by the combined excavation method has technical problems such as large differences in stiffness and unknown seismic effects. Therefore, a shaking table test with a geometric scale of 1/20 is carried out to investigate the seismic performance of the station structure. Using the flexible connection, the peak accelerations of pipe-jacking structures when the seismic wave

is input along the transverse direction of the station are larger than those along the longitudinal direction. The peak accelerations of pipe-jacking at the end with the larger mass is larger. Using rigid connection, the overall circumferential-joint extensions is larger than that of the flexible connection. The theoretical analysis is more suitable for flexible connection conditions. When the maximum circumferential-joint extension is small, the experimental value is smaller than the theoretical value.

Key words metro; station; combined excavation; structure seismic resistance; shaking table

First-author's address Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China

0 引言

城市地铁具有缓解交通压力、提升出行效率等功能毋庸置疑。然而, 1995 年日本阪神大地震中, 神户地铁多个车站遭受损坏, 其中大开车站坍塌, 表明应对地下结构抗震性能高度重视。

许多学者应用振动台试验方法进行地铁车站的抗震性能研究。文献[1]通过振动台试验和数值模拟重现了大开车站在 1995 年阪神大地震中的破坏过程。文献[2]开展了国内首次地铁车站振动台试验, 初步解决了地铁车站振动台试验设计的相关问题。此后, 许多学者在振动台试验中观察到中柱是地铁车站抗震的薄弱环节, 但大部分研究是针对箱式框架车站的, 如文献[3-5]的研究。

近年来, 装配式地铁车站、无跨地铁车站、异跨地铁车站、中庭式地铁车站、十字换乘车站等新型地铁车站结构形式的地震下动力响应也得到重视。文献[6]开展了上软下硬地层大跨无柱地铁车站的

* 上海申通地铁集团有限公司科研计划项目(JSKY17R031-10); 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52061135112); 土木工程防灾国家重点实验室课题(SLDRCE19-A-13)

振动台试验。文献[7]进行了细砂场地中两层装配式地铁车站的振动台试验。文献[8]进行了中庭式地铁车站振动台试验,车站模型长度相似比为 1/30。文献[9]首先建立了土-异跨地铁车站有限元模型,然后通过损伤分析预测地铁车站破坏模式。文献[10]开展了中庭式地铁车站的振动台试验。文献[11-13]开展了十字换乘车站在上海软土中的一系列振动台试验,车站模型长度相似比为 1/25,底层柱被验证为地震中的薄弱部位,与大开车站的破坏现象一致。

然而,迄今为止,极少有研究关注两端明挖框架、中间暗挖顶管的明-暗挖地铁车站结构。明-暗挖地铁车站的构形复杂,由不同工法实现的结构刚度突变显著,在地震下其抵抗变形的能力是值得研究的。本文以上海市轨道交通 14 号线静安寺车站为依托,开展软土地面明-暗挖地铁车站结构的振动台试验,探究顶管结构与框架结构接头刚度对车站抗震性能的影响规律。该研究有助于拓展对不同结构类型地铁车站抗震性能的认识,为明-暗挖地铁车站实际工程的抗震设计提供参考。

1 试验设计

1.1 模型箱与相似比设计

本试验采用同济大学土木工程防灾国家重点实验室多功能振动台试验系统。振动台台面尺寸为 10 m×6 m,由 2 个 4 m×6 m 振动台组合而成,总承载能力为 140 t。振动台具有横向、纵向以及扭转 3 个振动自由度。台面最大加速度加载能力为 1.5 g,工作频率为 0.1~50.0 Hz。

本试验采用层状剪切式模型箱,箱体尺寸为 10 m(长)×6 m(宽)×2 m(高),通过切换水平地震激励方向实现两向激励。本试验相似比通过 Buckingham- π 理论确定。试验中模型需要满足的相似关系如表 1 所示。

表 1 模型相似关系
Tab. 1 Similitude relations of model

物理量	相似系数	物理量	相似系数
长度	1/20	加速度	1
弹性模量	0.016	质量	4.9×10^{-5}
密度	0.39	时间	0.224

1.2 模型土与模型结构设计

模型土由砂和锯末混合制成。通过对不同质

量比的模型土进行动三轴试验,且比较候选模型土与实际场地土的密度相似比和剪切模量相似比,最终确定试验所用模型土中锯末和砂的质量比为 1.0:2.5。

试验模型的结构部分包括车站框架结构和车站顶管结构,均以土与结构相对刚度比为指标反应原型系统的土与结构相互作用的特性。

车站框架结构采用镀锌钢丝模拟钢筋,用微粒混凝土模拟原型混凝土,命名为 A、C 区。车站框架结构沿纵向 A 区长 3.5 m,C 区长 1.0 m,两端框架结构的宽高相同,分别为 1 432 mm 和 1 153 mm。

车站顶管结构采用冷轧薄钢板模拟原型顶管中的钢结构,命名为 B 区。车站顶管结构沿纵向每段长 100 mm,接头部分为承插式结构,内部布置有肋板。

顶管和车站连接部位设置了连接刚度不同的两种连接方式。试验使用橡胶带填充模拟柔性连接,使用纤维布和环氧树脂加固成法兰状模拟刚性连接。车站模型各部分照片如图 1 所示。

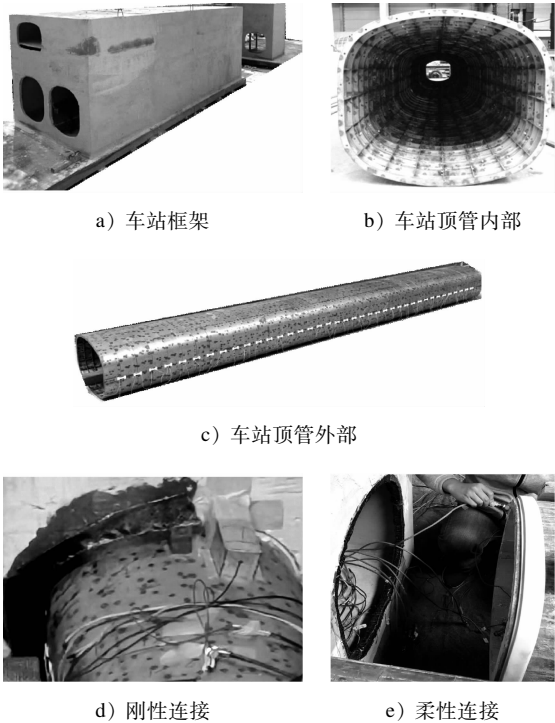


图 1 模型结构照片

Fig. 1 Photos of model structure

1.3 测点布置

试验测点包括以下 3 个部分:场地土内部加速度测点,车站结构加速度测点及顶管接缝处的环缝张开量测点。场地土内部加速度测点分为纵向加

速度测点和横向加速度测点两类,分别以 X 和 Y 编号,编号的第一位数字代表每列测点水平位置,第二位数字代表测点埋深,按埋深从小到大编号为 1 至 6。车站单根顶管管环数量为 41,距离 A 区框架最近的管环编号为 1,依次编号至距离 A 端最远的、编号为 41 的管环。在车站中间顶管 6 个关键断面位置管节顶部布置管环加速度测点,编号为 AB1-2、AB1-10、AB1-18、AB1-24、AB1-32、AB1-40,以及 AB2-2、AB2-10、AB2-18、AB2-24、AB2-32、AB2-40,编号中的前一位数字代表测点所处顶管编号,第二位数字代表测点所处管环编号。在车站顶管管节两侧布置应变式位移计作为环缝张开量测点,编号为 SD1-1—SD1-80 和 SD2-1—SD2-80,编号中的第一位数字代表测点所处顶管编号,第二位数字代表测点所处环缝位置,从 1 开始管环两侧交替编号。在顶管与框架车站连接部位布置电感式位移传感器 DA1、DA2、DC1、DC2,编号中的第二位字母代表测点所处端头位置,数字代表测点所处顶管编号。测点布置如图 2 所示。

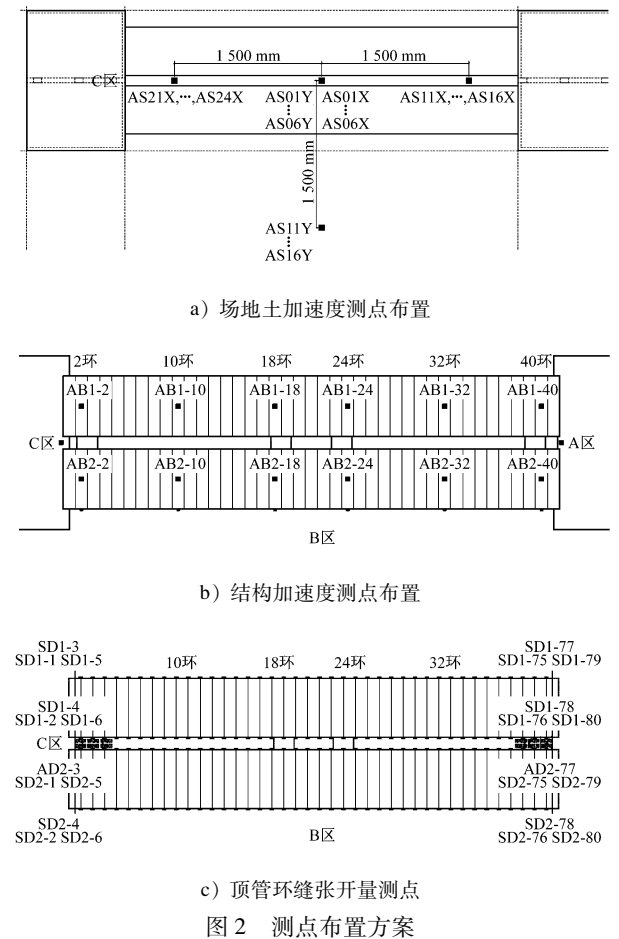


图 2 测点布置方案

1.4 试验工况

本试验地震动输入选用上海人工波。根据相似关系换算的上海人工波如图 3 所示,其加速度峰值为 0.1 g,主频为 16.2 Hz,白噪声加速度峰值为 0.05 g。试验中地震波分别沿振动台 X 向和 Y 向输入,对应车站模型纵向和横向方向。试验各工况输入的地震波如表 2 所示。在输入地震动时限制模型箱在另一方向的自由度,保证模型箱的层间位移仅发生在输入地震动对应方向。为探究连接段刚度对车站抗震性能的影响,在模型连接段分别采用柔性连接和刚性连接。

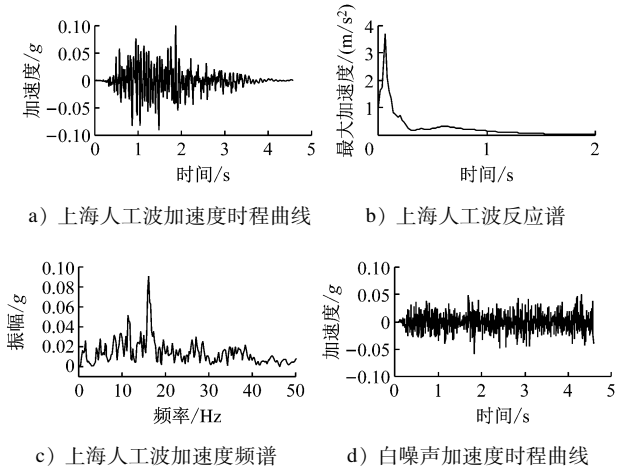


图 3 输入地震波
Fig. 3 Input seismic wave

表 2 振动台试验输入地震波工况		
Tab. 2 Shaking table test input seismic wave condition		
编号	地震波波形	加速度峰值/g
1	白噪声	0.1
2	白噪声	0.2
3	上海人工波	0.1
4	上海人工波	0.2

2 试验结果分析

2.1 场地基频

试验中设置了加速度峰值为 0.1 g 和 0.2 g 的白噪声工况,用于检测模型场地是否由于输入地震波发生动力特性的变化。图 4 是两种白噪声工况下模型场地地表相对于底部的加速度频谱放大系数。由图 4 可以看到,两条曲线最高点对应的横坐标完全一致,这说明试验过程中模型场地的基频未发生变化。

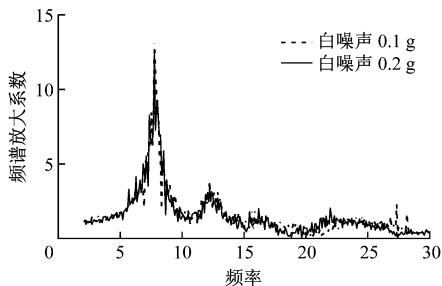


图4 模型场地加速度频谱放大系数

Fig. 4 Amplification factor of model site acceleration spectrum

2.2 场地土体加速度

图5为沿顶管横向输入加速度峰值0.1 g上海人工波工况下,场地土体加速度峰值放大系数沿深度变化曲线。由图5可以看到,远离结构的场地土体上部存在加速度放大效应,地表放大系数为1.54;由于车站与周围土体在刚度和密度上存在差异,靠近结构的场地土体在结构底部和地表的峰值加速度放大效应均强于远离结构区域,地表放大系数为2.34。

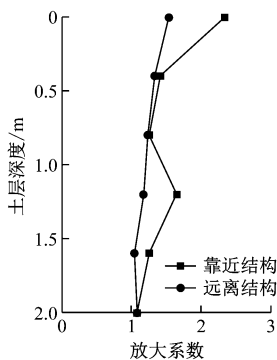


图5 场地土加速度放大系数

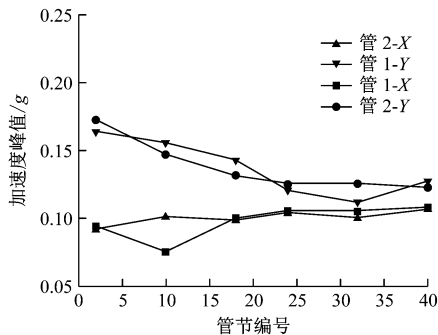
Fig. 5 Site soil acceleration amplification factor

2.3 顶管加速度峰值响应

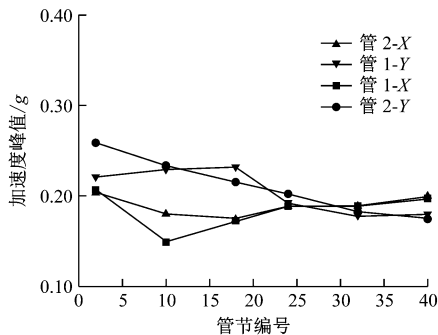
顶管与车站框架结构采用柔性连接,分别输入加速度峰值为0.1 g、0.2 g上海人工波时顶管的加速度响应峰值如图6所示。地震动沿Y向输入时顶管的加速度响应大于沿X向输入的加速度响应。

采用柔性连接时,沿X向输入地震动引起的顶管加速度峰值基本在同一水平,而沿Y向输入地震动时顶管加速度峰值具有不一致性。沿Y向输入地震动时,靠近A区顶管加速度峰值较小。沿Y向输入时,测点AB1-40的加速度响应峰值为0.127 g;测点AB1-2的加速度响应峰值为0.164 g,相比测点AB1-40的增大29%。

图7为顶管与车站框架结构采用刚性连接时顶



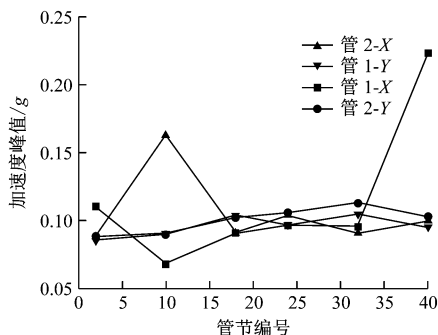
a) 0.1 g 上海人工波



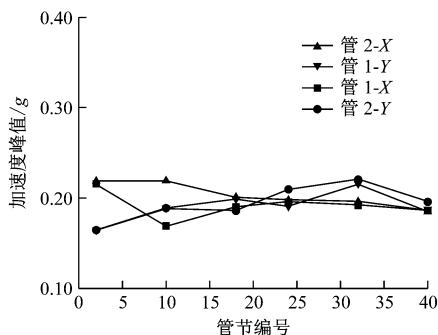
b) 0.2 g 上海人工波

图6 顶管加速度响应峰值(柔性连接)

Fig. 6 Peak acceleration response of jacking pipe (flexible connection)



a) 0.1 g 上海人工波



b) 0.2 g 上海人工波

图7 顶管加速度响应峰值(刚性连接)

Fig. 7 Peak acceleration response of jacking pipe (rigid connection)

管的加速度响应峰值。除了加速度峰值 0.1 g 沿 X 向输入工况下测点 AB2-10、AB1-40 数据异常(加速度响应频谱存在幅值较大的低频成分),采用刚性连接的车站模型的顶管加速度响应峰值无明显变化趋势。

综合分析可知:采用柔性连接时,沿顶管横向输入的地震波会使顶管产生沿长度方向不均匀分布的加速度峰值;沿顶管横向输入地震波时,顶管峰值加速度整体大于沿顶管纵向输入地震波时的顶管峰值加速度。采用柔性连接时,顶管整体及框架车站各层的加速度峰值均大于采用刚性连接时的加速度峰值。

2.4 顶管环缝张开量

沿纵向输入加速度峰值 0.1 g 上海人工波时,顶管环缝张开量的分布情况如图 8 所示。采用柔性连接时,各管节环缝接头张开量总体较小,最大值为 0.008 mm ;采用刚性连接时,各管节环缝接头张开量总体较柔性连接时大,最大值为 0.172 mm ,并且在顶管中间部分出现了较多突变点。无论采用柔性连接还是刚性连接,靠近 A 区框架一端环缝张开量整体大于靠近 C 区框架一端的环缝张开量。

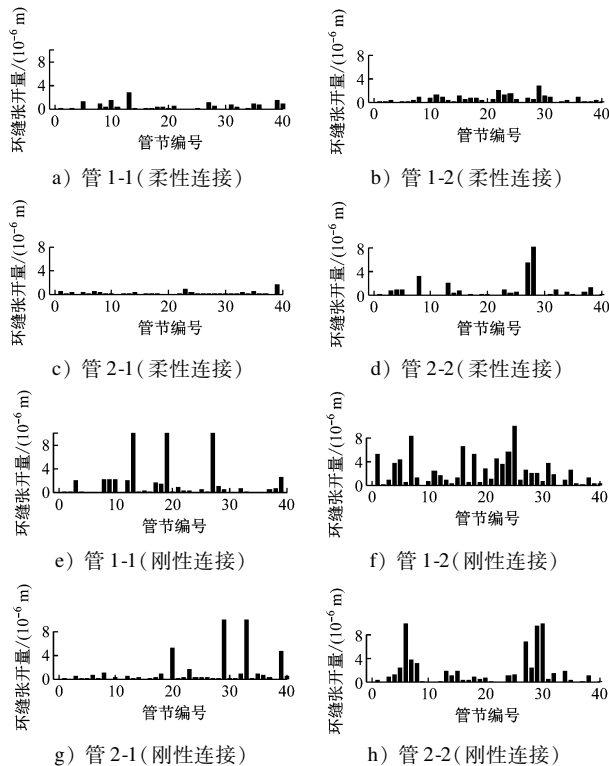


图 8 顶管环缝张开量

Fig. 8 Circumferential-joint extension

综合分析可知:相比刚性接头,采用柔性接头将降低顶管整体环缝张开量。

2.5 试验结果与工作井-隧道模型对比分析

文献[14]开展了工作井-隧道振动台试验,并针对隧道环缝张开量进行了理论推导。该理论将工作井简化为刚体,隧道简化为 Euler-Bernoulli 梁,隧道轴线垂直于工作井表面并固接于工作井,地震动沿垂直隧道轴线方向输入,假设隧道横截面无变形。基于以上假设,到工作井-隧道接头距离为 x_j 处的环缝张开量最大值 δ_{\max} 为:

$$\delta_{\max} = \sqrt{2}u_{\max}r(1 + \sin\varphi) \quad (1)$$

$$\beta^2 l_s e^{-\frac{\beta}{2}x_j} \cos\left(\frac{\beta}{\sqrt{2}}x_j + \frac{\pi}{4}\right)$$

其中 φ 由下式定义:

$$\varphi + \cot\varphi = \pi\left(\frac{1}{2} + \frac{nk_j l_s}{E_l A_l}\right) \quad (2)$$

β 由下式定义:

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_h}{(EI)_{\text{eq}}}} \quad (3)$$

其中 $(EI)_{\text{eq}}$ 为隧道等效抗弯刚度,由下式定义:

$$(EI)_{\text{eq}} = \frac{\cos^3\varphi}{\cos\varphi + \left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)\sin\varphi} E_l I_l \quad (4)$$

式中:

r ——隧道半径;

l_s ——隧道管片宽度;

u_{\max} ——隧道与工作井最大相对位移,由加速度数据作二次积分得到;

n ——单个管环纵向螺栓个数;

k_j ——每个纵向螺栓抗拉刚度;

E_l ——隧道衬砌弹性模量;

A_l ——隧道横截面积;

k_h ——地基弹簧刚度(将土体简化为 Winkler 地基);

I_l ——隧道横截面惯性矩。

明-暗挖地铁车站模型与工作井-隧道模型大体相似,比如均为隧道与其他地下结构连接、均存在刚度突变等,不同之处在于工作井-隧道模型中隧道仅一侧与工作井相连,而明-暗挖地铁车站模型中隧道两侧均与框架式地铁车站相连。因此在对比时仅考虑从一侧框架式地铁车站到暗挖顶管隧道中点处的环缝张开量。选取沿横向输入峰值加速度 0.1 g 上海人工波时,管 1 靠近 C 端框架的最大环缝张开量数据与理论值做比较,结果如图 9—10 所示。

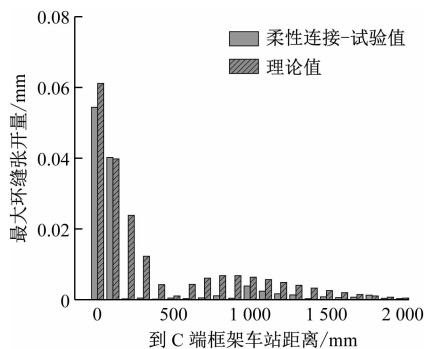


图9 最大环缝张开量试验值与理论值对比(柔性连接)

Fig. 9 Comparison of test and analytical maximum circumferential-joint extension value (flexible connection)

如图9所示,车站接头采用柔性连接时,试验测得最大环缝张开量变化趋势与理论预测相同。但当环缝张开量最大值较小时,试验值显著低于理论值。进行理论分析时假设隧道抗弯刚度不变,即隧道抗弯刚度与环缝张开量无关,但明-暗挖地铁车站模型中顶管隧道采用承插式接头,在环缝张开初期接头抗弯刚度较大,对最大环缝张开量有限制作用。所以在最大环缝张开量较小时,会出现试验值显著偏小的情况。

如图10所示,车站接头采用刚性连接时,试验测得最大环缝张开量沿隧道轴向的变化趋势与理论预测差距较大,尤其是在明-暗挖接头处。进行理论分析时假设隧道为 Euler-Bernoulli 梁且与工作井为固定连接,其抗弯刚度沿全长相等。但在明-暗挖地铁车站模型中,采用纤维布和环氧树脂形成刚性类法兰盘结构模拟刚性接头,对靠近明-暗挖接头处的管环起到了增大刚度的作用,不满足理论分析中的隧道等刚度假设,所以明-暗挖接头处的最大环缝张开量试验值与理论值差距较大。

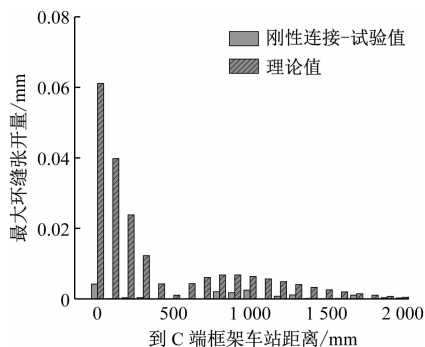


图10 最大环缝张开量试验值与理论值对比(刚性连接)

Fig. 10 Comparison of test and analytical maximum circumferential-joint extension value (rigid connection)

3 结语

本文通过大比尺土-结构振动台试验,研究明-暗挖地铁车站采用不同刚度接头时的地震响应,对比不同接头刚度对顶管加速度峰值和最大环缝张开量的影响,探讨已有理论分析对不同接头刚度情况的有效性,得出以下结论:

1) 地铁车站顶管段与框架段连接处采用柔性连接时,地震波沿车站横向输入相较于沿车站纵向输入,会使顶管加速度峰值增大,且沿车站横向输入地震动时,由于顶管两端框架结构质量不同,质量较大的一端顶管加速度峰值较大;连接处采用刚性连接时,顶管加速度沿纵向分布均匀,且不同的地震波输入方向对顶管加速度峰值影响很小。

2) 地铁车站顶管段与框架段连接处采用柔性连接时,顶管环缝张开量较小;采用刚性连接时,顶管环缝张开量较大。由于两端框架的不对称和车站质量分布不均匀并不受接头刚度变化的影响,因此采用柔性连接时顶管的刚度突变程度较小,降低了环缝张开量。且无论采用柔性连接还是刚性连接,顶管环缝张开量均存在框架结构质量较大的一侧环缝张开量较大,质量较小的一侧环缝张开量较小的现象,采用柔性连接时这种现象更为明显。

3) 最大环缝张开量理论值与采用柔性接头时的明-暗挖地铁车站试验值趋势相同,当最大环缝张开量较小时,试验值相对理论值偏小。

参考文献

- [1] IWATATE T, KOBAYASHI Y, KUSU H, et al. Investigation and shaking table tests of subway structures of the Hyogoken-Nambu earthquake[C]//IAEE. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Tokyo: IAEE, 2000:1042.
- [2] 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(1):7.
YANG Linde, JI Qianqian, ZHENG Yonglai, et al. Shaking table test on metro station structures in soft soil[J]. Modern Tunneling Technology, 2003(1):7.
- [3] CHEN Z, CHEN W, LI Y, et al. Shaking table test of a multi-story subway station under pulse-like ground motions[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 82:111.
- [4] MA X, WANG G, WU J, et al. Experimental study on the seismic response of subway station in soft ground[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2017, 11(1):1750020.

(下转第 203 页)