

基于反应位移法的分片预制装配式 综合管廊抗震性能分析

潘钦锋¹, 陈伟恩², 郭瑞³, 苏丹凤⁴, 苏福庆⁵

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118; 2. 福建省建筑设计院有限公司, 福建 福州 350000;
3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 4. 厦门中亚联合建设工程有限公司, 福建 厦门 361000;
5. 福建梓诺建筑工程有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 为探讨分片预制装配式综合管廊的抗震性能,在总结国内外综合管廊抗震分析方法的基础上,以山东某实际工程背景,基于反应位移法采用有限元软件 SAP2000 建立相应的数值模型,对该综合管廊进行抗震设计分析与验算,并分析多种荷载组合工况对该结构内力大小及其分布的影响规律。结果表明:多种荷载工况条件下,最不利弯矩、剪力主要集中在侧墙与顶板之间位置;管廊通常可直接按照荷载标准组合进行抗震设计,但对于高烈度地区,地震作用组合可能起控制作用;分片预制装配式综合管廊在设计拼接截面处受力较小,有利于预应力筋的连接布置,而角部控制截面承载能力经验算亦满足设计要求。

关键词: 装配式综合管廊;抗震性能;反应位移法;结构内力

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)06—0138—06

Seismic Performance Analysis of Split-Prefabricated Utility Tunnel based on Response Displacement Method

PAN Qinfeng¹, CHEN Weien², GUO Rui³, SU Danfeng⁴, SU Fuqing⁵

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou, Fujian 350118, China;

2. Fujian Architectural Design Institute Co., Ltd, Fuzhou, Fujian 350000, China;

3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

4. Xiamen Zhongya Unite Construction Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China;

5. Fujian Zinuo Construction Group Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361000, China)

Abstract: In order to discuss the seismic performance of the split-prefabricated utility tunnel, the seismic analysis methods of the utility tunnel are firstly summarized. Then, based on the response displacement method, the numerical model is established by using the finite element software SAP2000, and the analysis of the seismic resistance design and recalculation of the utility tunnel are conducted. In addition, the effects of various load cases on the internal forces of the structure are analyzed. The results show that the maximum bending moment and shear force are mainly distributed between the side wall and the roof. Moreover, the seismic design of utility tunnel can be directly carried out according to the load standard combination, but for those areas with high-intensity earthquake design, the seismic resistance combination may play a key role. The split sections of the prefabricated utility tunnel show relatively small mechanical responses, which is beneficial to the connection approach of the pre-stressed bars, and also, the bearing capacity of the structure's corner meets the design requirements after the corresponding re-calculation in accordance with codes.

Keywords: prefabricated utility tunnel; seismic performance; response displacement method; internal force

随着我国城市化建设进程的迅速发展,地面空间变得愈发拥挤,迫切需要大规模的开发利用城市地下空间以满足基础设施建设的需求,如将燃气管道、电力、通讯和交通设施等由地面转移至地下,在节约大量城市用地的同时,还使城市建设更加整齐、美观。而城市地下空间的合理开发与利用,正是我国实施城市可持续发展的必然选择和重要途径^[1],故近年来地下综合管廊(见图1)在我国城市建设中得到了迅速的发展。

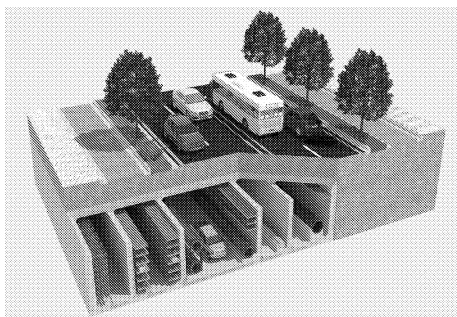


图1 地下综合管廊示意

大力发展地下综合管廊,其抗震性能的设计应为重要因素之一。然而,相对地面建筑结构,人们通常认为地下结构的数量非常少且抗震性能较好,但多次地震震害表明^[2-4],地下综合管廊易因地震动作用导致结构损坏,并且损坏后难以对其进行维修加固。因此,国内外学者不仅对地下综合管廊的静力性能展开了大量研究^[5-6],还重点关注该地下结构的抗震问题。例如:薛伟辰等^[7]以上海世博会园区综合管廊为工程背景,对预制预应力综合管廊受力展开了研究,结果表明管廊破坏形式为侧壁端部截面屈服,而预制接头部位的受力良好。刘泽民^[8]对比了时程分析法和反应位移法计算地铁车站结构在地震中的受力情况,认为反应位移法的计算较为简单、高效,具有良好的实用价值。Hatzigeorgiou等^[9]研究了土体-结构相互作用对综合管廊的影响,确定了浅埋综合管廊的地震非弹性响应阶段的关键参数。张景威等^[10]以输入多条随机地震动的方式,通过地震响应时程分析分析了关键节点的位移响应,建立了结构性能参数与地震动强度的关联。

为此,本文首先简要总结了常见的地下综合管廊抗震分析方法,并在此基础上基于反应位移法,采用有限元软件 SAP2000 建模并进行抗震设计计算并进行安全性验算,探讨荷载基本组合、标准组合以及地震作用组合工况条件对综合管廊内力大小及其分布的影响规律,旨为地下结构抗震设计提供参考。

1 地下综合管廊抗震分析方法

参考有关研究成果^[11-14],本文将地下综合管廊的抗震分析方法大致归纳为四种,即原型观测法、模型试验法、拟静力法和数值模拟法。各分析方法的特点简要叙述如下:

(1) 原型观测法:该方法是通过在管廊及其周围土体中布置传感器的方式,待地震发生时达到实测结构地震响应的目的。可见,该方法是研究地下综合管廊最直接、真实、有效的方式,但因地震的不可预见性,使得监测仪器的长期设备维护与更新费用成本较高,而获取的数据却非常有限。

此外,震后调查也是该分析方法的重要手段之一,它可展示综合管廊在震后的破坏状态和损伤程度,为地震响应分析提供实际资料,但地下综合管廊主要为隐蔽工程,导致很多震害现象难以直接观测。鉴于上述因素影响,同时考虑到实际工程参数往往比较单一,使得原型观测法在地下综合管廊的抗震性能研究中难以应用。

(2) 模型试验法:将综合管廊按照足尺或缩尺比例的方式制作相应的模型,采用地震台输入地震动来模拟实际的地震作用,以观测整个结构体系在地震作用下的动力响应。显然,该方法在模拟地面建筑结构时具有较高的参考价值,然而,它在测试地下结构时影响因素众多,例如无法考虑近似半无限的土体与地下结构之间的相互作用、边界约束效应难以控制等。

由于这些地下条件在试验过程中难以模拟,无法还原出综合管廊在地下对应土质、压力等受力情况,导致该方法的抗震分析结果往往还是与地面结构相似,而可靠的土体-地下结构体系的抗震性能试验处理方式尚待进一步研究。

(3) 拟静力法:该方法是将实际地震激励作用等效为静力作用,由此通过某静力计算模型来计算地下结构的内力或变形等。基于上述理念,国内外学者结合理论、地震资料以及试验情况,经大量研究后提出了多种简化的拟静力计算方法,其中包括反应位移法、反应加速度法、自由场变形法、静力弹塑性法以及地震系数法等。文献[15]比较了三种拟静力方法在浅埋地下结构抗震设计的差异和使用性,结果发现反应位移法更加适用于不同刚度浅埋地下结构的抗震设计。

(4) 数值模拟法:该方法是将整个结构体系划分为有限个单元,每个单元又具备质量、刚度和尺寸等性质,再经有限元软件求解以得到其数值解,故该

方法的通用性较强,可用来模拟大量实际案例。

在计算地震作用下结构的动力响应时,学者们采用时程分析法根据实际或人工地震时程加速度曲线,将地震过程通过时间参数直观表现出来;并且,考虑了地下结构与结构周围土体介质的相互作用,在满足变形协调条件下分别计算结构物和岩土体介质的位移、应力和加速度响应等,但同时该方法的计算量较大且对模型的处理较为复杂,不适合作为地下结构的抗震设计方法。

结合上述内容总结,按照我国《城市轨道交通结构抗震设计规范》^[16](GB 50909—2014)和《地下结构抗震设计标准》^[17](GB/T 51336—2018)规定,本文选用反应位移法进行抗震设计计算,认为综合管廊在地震作用时的响应主要取决于周围地层的运动,将地层此时对应的相对位移通过地基弹簧以静荷载的形式作用在廊体结构上,最终得到结构的内力大小及分布。反应位移法的计算模型示意如图 2 所示,其原理及详细计算过程参见文献[8],本文不再赘述。

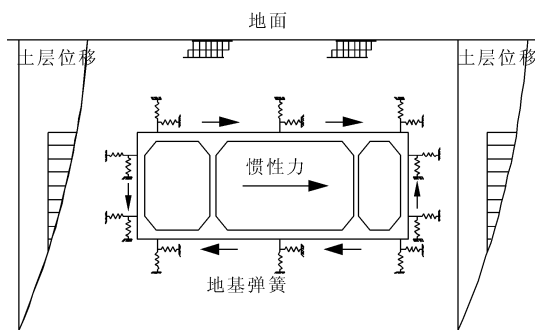


图 2 反应位移法示意

2 工程实例分析

2.1 工程概况

本文以山东某分片预制装配式综合管廊建设项目为工程背景。该工程全长为 35.5 km,其中浅槽段为 16.4 km,区间结构宽度为 10.3 m,底板埋深为 8.25 m~10.25 m,顶板上覆土为 2 m~4 m,现状场平标高 2.123 m~24.660 m。本工程浅槽段区间采用明挖预制法施工,部分采用明挖现浇法施工。勘察期间在场地及钻孔内未发现对工程安全有影响的不良地质作用,也未发现影响地基稳定性的埋藏物及其它地下设施等。主体结构为单层双跨框架结构,结构高度为 6.05 m,结构宽度为 10.3 m,顶板、底板、侧墙厚度为 0.5 m,中隔墙厚度为 0.4 m,预制段结构断面如图 3 所示。

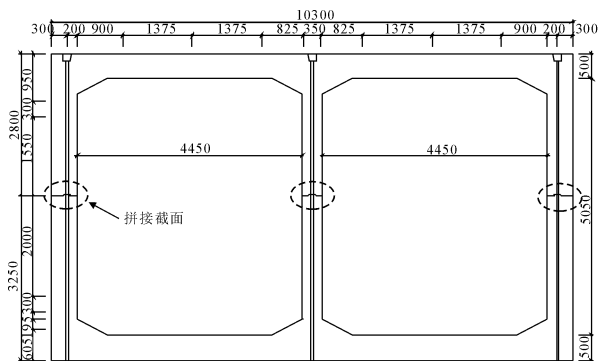


图 3 预制标准节段断面图(单位:mm)

地下结构的整体设计使用年限为 100 年,区间结构安全等级为一级。根据《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)、《建筑抗震设计规范(2016 版)》^[18](GB 50011—2010),拟建场区的抗震设防烈度为 7 度,设防类别划为重点设防类(简称乙类),设计基本地震加速度值为 0.10g,设计地震为第三组,并按照 8 度采取相应的抗震构造措施,以提高结构的整体抗震能力。该综合管廊为干式连接分片预制装配式综合管廊,拼接截面位于侧墙和中隔墙的中部,采用预应力筋进行可靠连接。普通钢筋等级为 HPB300 级、HRB400 级两种,预应力螺纹钢的公称直径为 40 mm。混凝土强度等级为 C50,抗渗等级为 P10。

2.2 模型构建

在单位长度范围内,覆土自重为 72 kN/m,侧向压力呈梯形分布,顶板与底板位置对应压力分布为 36 kN/m、90.45 kN/m;活荷载数值参考我国《城市桥梁设计规范》^[19](CJJ11—2011)规定,城市 A 级对应的均布荷载为 10.5 kN/m,集中荷载为 180 kN,汽车轮压在土体中按照 30 度扩散分布,由此得顶板和侧板活荷载分别为 17.6 kN/m、88.84 kN/m;参考规范[16]简化计算侧板剪切力为均布荷载,土体位移荷载为倒三角直线分布,如图 4 所示。考虑 E1、E2 和 E3 三种地震设防水准,分别计算其对应的等效荷载数值,汇总见表 1。

采用有限元软件 SAP2000 建立闭合框架模型,并沿杆件方向以 0.5 m 为间距均匀的布置法向与切向地基弹簧模型,如图 5 所示。其中,混凝土强度等级为 C50,其参数按照我国《混凝土结构设计规范》^[20](GB 50010—2010)规定选取。由于预制结构段为现浇混凝土,故结构的顶、底板与侧墙的连接方式等均设为刚接。需要指出,拼接位置是采用预应力筋连接,而文献[7]通过相应试验研究,其结果

表明预应力连接是合理、可靠的连接方法且整体结构的受力性能良好,为此本文在模型中不考虑分段对结构的影响。此外,根据《建筑结构可靠性设计统一标准》^[21](GB 50068—2018)考虑了基本组合、标准组合、E1—E3 地震作用组合,共计 5 种荷载组合方式,即对应 5 个荷载工况。

分布形式相似,且受力较大的位置主要集中在侧墙与顶板的连接部位,而侧墙与顶板连接、侧墙中部连接位置的受力则相对较小。这表明,侧墙与顶板之间位置是最不利截面,故分片预制装配式综合管廊的拼接截面应尽量避免设置在该区域,同时这也间接说明了本工程项目选取拼接位置的合理性。

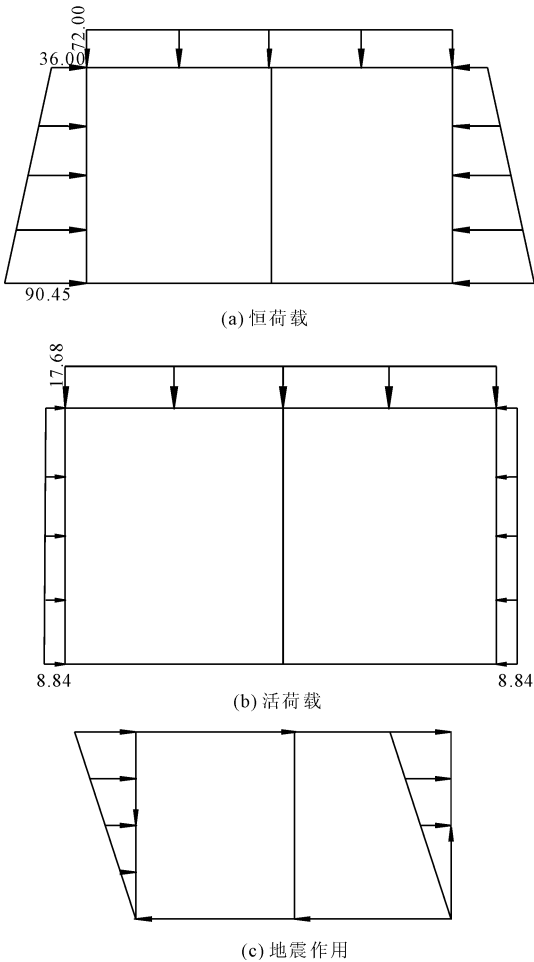


图 4 预制节段结构荷载分布

表 1 地震作用计算值

地震作用	顶部剪切力 /(kN·m ⁻¹)	底部剪切力 /(kN·m ⁻¹)	侧剪切力 /(kN·m ⁻¹)	土体位移荷载 /(kN·m ⁻¹)	惯性力 /(g·m)
E1	2.76	6.79	4.77	7.38	0.03
E2	4.13	10.19	7.16	11.07	0.05
E3	11.25	27.74	19.49	30.14	0.12

3 模型计算结果分析

3.1 截面内力及分布

结合第 2.2 节内容,SAP2000 模型在各工况条件下的后处理计算结果依次见图 6—图 10。可见,尽管弯矩与剪力在不同荷载工况下的数值不同,但

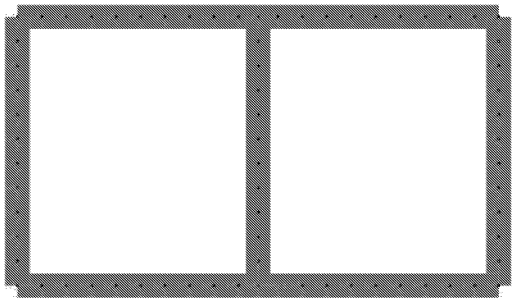


图 5 SAP2000 模型

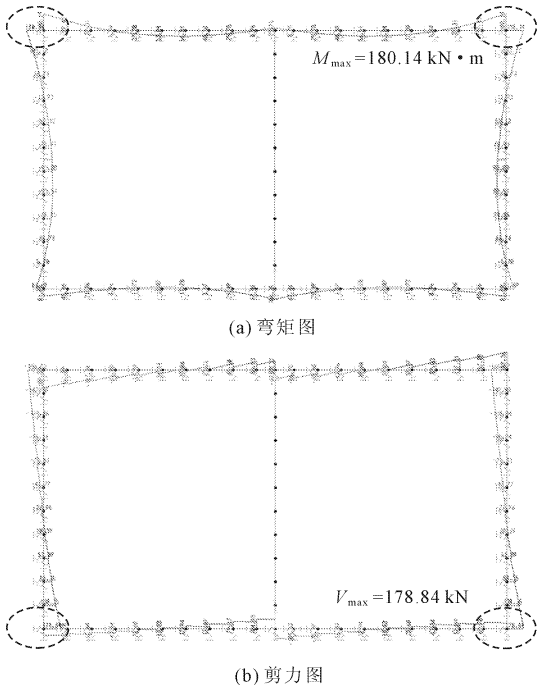
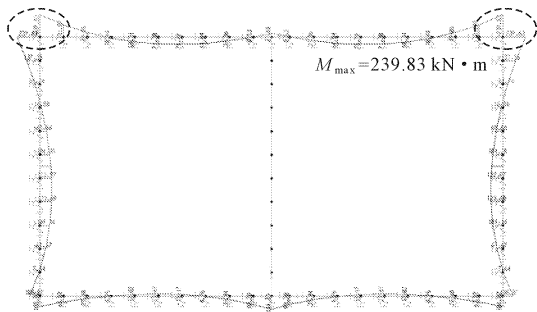
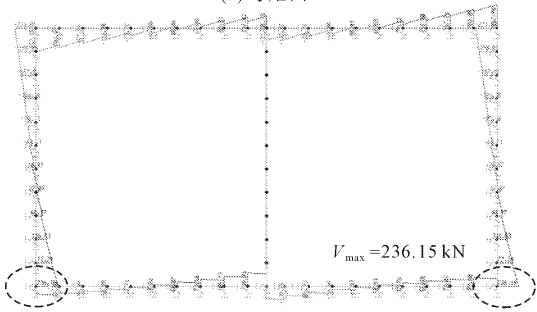


图 6 工况 1

此外,为详细对比各工况条件对该综合管廊结构受力性能的影响,取预制标准节段的角部位置与侧墙拼接截面的弯矩值进行汇总,见表 2。经对比可知,工况 2 和工况 5 对应的最不利弯矩较为接近,分别为 239.83 kN·m、225.07 kN·m,明显大于其它工况的数值。这说明,在综合管廊设计中,通常应以荷载标准组合值计算为主,地震作用组合往往不起控制作用;但对于我国高烈度地区而言,该地下综合管廊的配筋设计可能由地震作用组合计算控制,在设计时应予以重视。

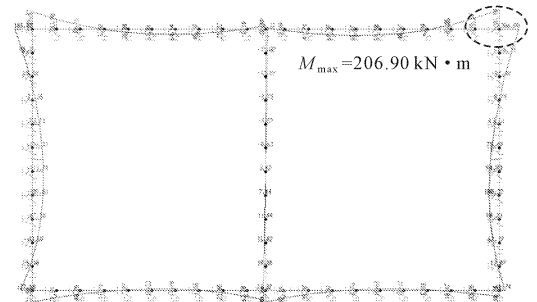


(a) 弯矩图

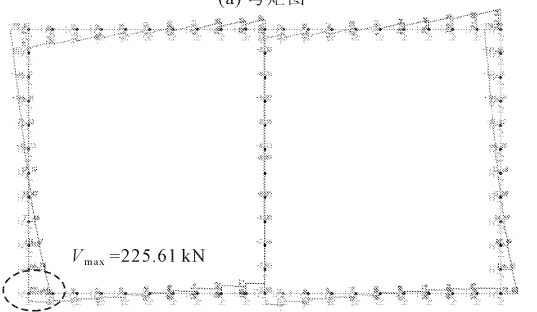


(b) 剪力图

图 7 工况 2

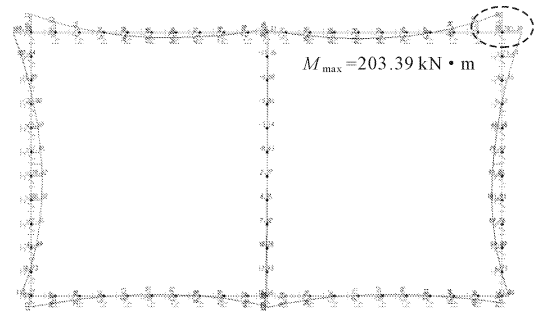


(a) 弯矩图

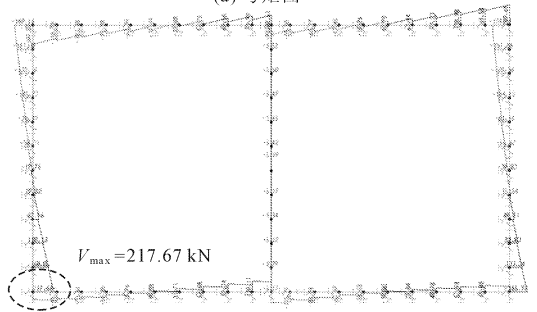


(b) 剪力图

图 9 工况 4

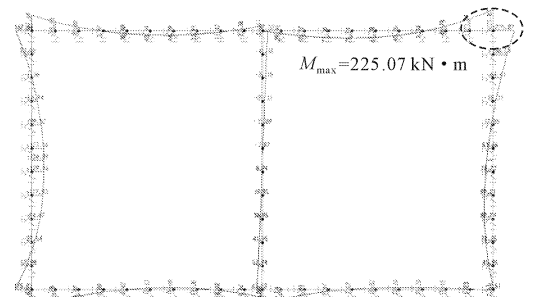


(a) 弯矩图

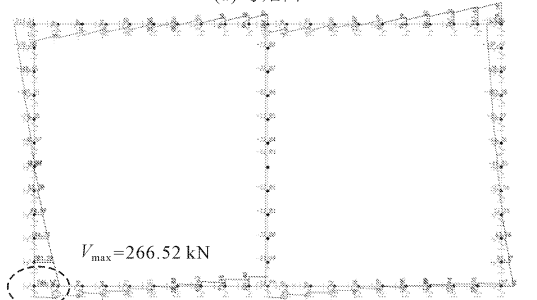


(b) 剪力图

图 8 工况 3



(a) 弯矩图



(b) 剪力图

图 10 工况 5

3.2 承载能力验算

根据我国《混凝土结构设计规范》^[20] (GB 50010—2010),对单位板带宽度节段控制截面的特征承载力进行理论计算。对于侧墙拼接截面而言,预应力筋偏心产生的预弯矩为 154.49 kN · m,而表 2 中拼接截面的最不利弯矩为 -130.62 kN · m,可知即使在地震作用条件下,拼接截面内侧亦仍保持受压状态,故该干式连接方式满足拼接设计要求。

此外,按照上述规范要求依次展开了管廊角部控制截面开裂、屈服及极限弯矩的计算,相应理论结果依次为 114.30 kN · m、334.25 kN · m、451.2 kN · m,可见其屈服弯矩设计值远远大于表 2 中角部的最不利弯矩(239.82 kN · m),整体结构的安全性高,而工程设计的钢筋混凝土结构的裂缝控制等级为三级,即允许出现裂缝。因此,预制标准节

段结构控制截面的配筋情况在静荷载、水平地震作 用下满足我国设计要求。

表 2 不同工况下的最不利弯矩值

荷载工况	弯矩/(kN·m)					
	左侧墙顶端	右侧墙顶端	左侧墙底端	右侧墙顶端	左侧墙拼接截面	右侧墙拼接截面
工况 1	180.14	180.14	81.69	81.69	-89.74	-89.74
工况 2	239.83	239.83	108.02	108.02	-118.68	-118.68
工况 3	189.33	203.39	112.27	71.06	-108.00	-93.32
工况 4	185.82	206.90	122.58	60.74	-111.69	-89.64
工况 5	167.64	225.07	175.82	-7.51	-130.62	-70.71

注:正弯矩表示壁板外侧受拉,负弯矩表示壁板内侧受拉。

4 结 论

本文首先对综合管廊抗震分析方法进行了总结,结合实际工程项目,基于反应位移法采用有限元软件 SAP2000 建立了数值模型,分析了其在多种荷载工况下的截面内力大小及分布,并按规范进行了安全性验算。主要结论如下:

(1) 最不利弯矩和剪力主要集中分布在侧墙与顶板之间的位置,建议分片预制装配式综合管廊的拼接截面避免设置在该区域。

(2) 在结构设计时,通常情况下以荷载的标准组合值计算为主,但对于我国高烈度地区,地震作用组合值可能起控制作用,应予以重视。

(3) 分片预制装配式综合管廊在设计拼接截面处受力较小,有利于施加预应力筋连接布置;此外,在静力、地震作用工况下的管廊角部控制截面承载能力验算满足设计要求。

参考文献:

[1] 刘晶波,王文晖,赵冬冬. 地下结构横截面抗震设计分析方法综述[J]. 施工技术,2010,39(6):91-95.

[2] Hamidreza R, Hossein S J. The bam (Iran) earthquake of December 26, 2003: from an engineering and seismological point of view [J]. Journal of Asian Earth Science, 2006,27(5):576-584.

[3] 李 乔,赵世春. 汶川大地震工程震害分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2008.

[4] Bhalla S, Yang Y. Structural health monitoring of underground facilities-technological issues and challenges [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005,20(5):487-500.

[5] 张晓曦,丁思盼,夏樟华,等. 基于整体模型的预制拼装综合管廊节段接头抗弯性能分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(6):135-139.

[6] 顾卫兵,冯宇韬,刘江涛,等. 预制装配式管廊受力性

能试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(1):91-97.

[7] 薛伟辰,胡 翔,王恒栋. 上海世博园区预制预应力综合管廊力学性能试验研究[J]. 特种结构,2009,26(1):105-108.

[8] 刘泽民. 考虑抗震组合的反应位移法计算模型研究[J]. 国防交通工程与技术,2020,18(2):14-16.

[9] Hatzigeorgiou G D, Beskos D E. Soil-structure interaction effects on seismic inelastic analysis of 3-D tunnels [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2010, 30(9):851-861.

[10] 张景威,周 晶. 地下综合管廊结构的易损性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):48-53.

[11] 廖智麒. 综合管廊地震响应分析及影响因素研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.

[12] 谷拴成,朱 彬,马德梅. 地下结构抗震分析方法及其现状[J]. 西安科技大学学报,2005,6(2):143-146.

[13] 刘述虹. 典型综合管廊体系地震响应分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2016.

[14] 李正英,余书君,魏奇科,等. 设置锚锚钢筋的地下综合管廊墙板节点的抗震性能[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2021,43(3):157-166.

[15] 袁 勇,禹海涛,陈之毅. 软土浅埋框架结构抗震计算方法评价[J]. 振动与冲击,2009,28(8):50-56.

[16] 城市轨道交通结构抗震设计规范:GB 50909—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.

[17] 地下结构抗震设计标准:GB/T 51336—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[18] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[19] 城市桥梁设计规范:CJJ11—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.

[20] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

[21] 建筑结构可靠性设计统一标准:GB 50068—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.