

## 8度抗震设防地区综合管廊的结构设计

周 敏

(同济大学建筑设计研究院<集团>有限公司, 上海 200092)

**摘 要:** 在松原市某8度抗震设防地区综合管廊项目设计中,选用“田”字型管廊结构,将管线管廊和雨水箱涵相结合,满足入廊管线和工艺排水的要求,同时节约了工程施工造价。将管廊变形缝橡胶止水带不锈钢板部分采用铆钉连接,橡胶部分采用热熔连接,解决了止水带施工搭接不严的难题。对8度区的管廊进行了承载能力极限状态、正常使用极限状态和抗震设计,抗震计算采用了反应位移法,结果表明,管廊外框架的配筋由正常使用极限状态荷载组合的效应设计值控制,中隔墙和中隔板的配筋由地震作用荷载组合的效应值控制。 $\varnothing 850$ 的SMW水泥土搅拌墙在管廊基坑的应用,成为密实砂质土层地区首例成功实施的案例。

**关键词:** 综合管廊; 防水设计; 抗震设计; 反应位移法; 雨水箱涵

**中图分类号:** TU990.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2019)10-0075-08

## Structure Design of Utility Tunnel in Seismic Fortification Region with 8-degree Intensity

ZHOU Min

(Tongji Architectural Design <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China)

**Abstract:** In order to meet the requirement of corridor pipe, drainage process, and saving construction cost, the “田” shape structure form was reasonable applied to utility tunnel which combined with pipe utility tunnel and rainwater box culvert in Songyuan. The problem of poor construction of the waterproof strip in deformation joint was solved by using riveting of stainless steel plate and hot-melting connection of rubber. The design of bearing capacity limit state, normal service limit state and earthquake resistance were applied to utility tunnel with 8-degree intensity, and the response displacement method was applied in the seismic calculation. The calculation results showed that the reinforcement of outer frame was determined by the effect of load combination of normal service limit state, but the reinforcement of mid-partition wall and mid-partition plate was determined by the effect of load combination of earthquake action. The  $\varnothing 850$  SMW cement-soil wall was successfully used in excavations of utility tunnel, which was the first example in compacting sandy soil.

**Key words:** utility tunnel; waterproof design; seismic design; response displacement method; rainwater box culvert

2011年—2017年,我国综合管廊的建设进入了高速建设期,截至2017年,我国完成开工建设的综

合管廊达到2 000 km。过去几年,大量的综合管廊建设为管廊设计积累了丰富的经验。管廊结构的形

式丰富多样,从单舱至多舱、从方形至圆形均有大量的工程实例<sup>[1-2]</sup>。管廊结构设计的研究主要集中于结构受力分析和结构抗震设计,管廊结构一般为浅埋、小跨度的结构,受力形式较简单,国内文献主要针对交叉口节点<sup>[3]</sup>、大跨吊装口节点<sup>[4]</sup>、穿越复杂地层管廊结构<sup>[5-6]</sup>等特殊结构受力规律进行研究。管廊抗震设计目前运用较为广泛的是静力分析方法(反应位移法、反应加速度法)<sup>[7-8]</sup>和动力分析法(时程分析法)<sup>[3]</sup>,随着《地下结构抗震设计标准》(GB/T 51336—2018)<sup>[9]</sup>在2019年4月开始施行,今后的管廊结构抗震设计方法有明确规定。综合管廊作为地下结构,防水设计一直是关注的重点<sup>[10-11]</sup>,目前管廊一般以防水卷材、防水板或防水涂料为主材,结合变形缝处的止水带来达到管廊防水的目的。管廊结构与其他地下结构类似,施工方法分明挖法和暗挖法(顶管法、盾构法、山岭隧道法等)<sup>[12-13]</sup>。为响应国家绿色建筑的理念,预制管廊在近两年逐渐兴起<sup>[14]</sup>,但限于结构形式的多样性、工程造价等因素,预制管廊要全面推进还有较大的优化空间。

笔者依托松原市8度区综合管廊项目为背景,重点介绍管廊结构选型、结构计算、抗震分析以及管廊施工等关键节点设计,通过结构合理选型和合理计算达到管廊结构优化设计的目的。

## 1 项目背景

综合管廊项目位于松原市松花江北部片区,根据工艺的要求,入廊管线包括9孔10 kV电力管线、8孔通信管线、一根DN300~DN600给排水管道、DN450热力管道及江北片区雨水总管。按照规划要求,雨水总管采用箱涵形式,综合管廊布置于道路东侧的绿化带下,如图1所示。管廊全长3.3 km。

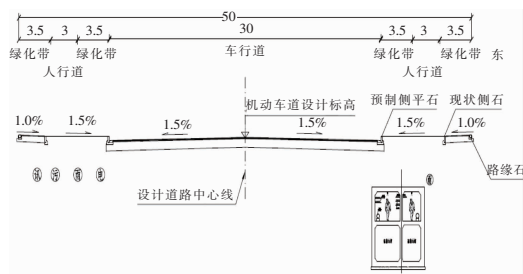


图1 综合管廊横断面

Fig. 1 Section of utility tunnel

根据勘察报告,综合管廊建设场地范围地形起

伏较大,呈北高南底,地面标高为137.26~143.96 m,高差为6.7 m。场地范围内土层为①杂填土、②粉质黏土、③粉砂、③<sub>1</sub>粉砂、③<sub>2</sub>粉质黏土、③<sub>3</sub>粉质黏土、④粉质黏土、④<sub>1</sub>粉砂、⑤细砂、⑤<sub>1</sub>粉质黏土、⑤<sub>2</sub>粉土、⑤<sub>3</sub>粉土,土层物理力学参数如表1所示。本工程管廊主要位于③粉砂中。

表1 拟建场地岩土层物理力学参数

Tab. 1 Physical parameters of soil layers

层号	岩土名称	容重/ (kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 C/ kPa	内摩擦 角 $\Phi$ /(°)	承载力 容许值 $f_{ao}$ /kPa
②	粉质黏土	19.2	19	20	180
③	粉砂	19.4	0	33	280
③ <sub>1</sub>	粉砂	19.3	0	27	170
③ <sub>2</sub>	粉质黏土	19.1	21	19	200
③ <sub>3</sub>	粉质黏土	19.0	20	18	160
④	粉质黏土	19.4	21	19	270
④ <sub>1</sub>	粉砂	19.3	0	30	190
⑤	细砂	19.2	0	38	320
⑤ <sub>1</sub>	粉质黏土	19.2	19	19	320
⑤ <sub>2</sub>	粉土	19.4	3	23	220
⑤ <sub>3</sub>	粉土	19.3	4	24	240

场区地下水属于潜水类型,主要贮存于第③层粉砂层至第⑤层细砂层中,稳定水位8.20~11.30 m,稳定水位标高为129.23~129.40 m。

松原市抗震设防烈度为8度,设计地震动加速度值为0.20g,设计特征周期为0.35 s,设计地震分组为第一组。管廊建筑场地类别为Ⅱ类,为建筑抗震一般场地。该工程场地15 m深度范围内无地震液化影响。

## 2 综合管廊结构设计

### 2.1 结构选型和计算

此次入廊的雨水箱涵为江北片区排水总管,管道的起点埋深为10.64 m,终点埋深为8.96 m,工艺确定雨水箱涵断面尺寸为双孔2.6 m×2.8 m,雨水箱涵顶覆土厚度为5.86~7.54 m。若采用传统的单排四孔管廊,由于覆土厚度较厚,管廊后期检修、吊装和人员出入均较困难,且施工期间基坑开挖范围较大,不利于节约工程造价。因此利用雨水箱涵上覆土高度,将管廊设计为“田”字形结构,上部为管线管廊空间:热力管线单独一个舱室,其他管线共用一个舱室;下部为双孔雨水箱涵空间,下部双孔雨水箱涵尺寸与上部管线管廊尺寸相协调,雨水箱涵两孔通过开洞互通。最终设计的管廊横断面如图2

所示,管廊上覆土厚度为 3.3 ~ 5 m。

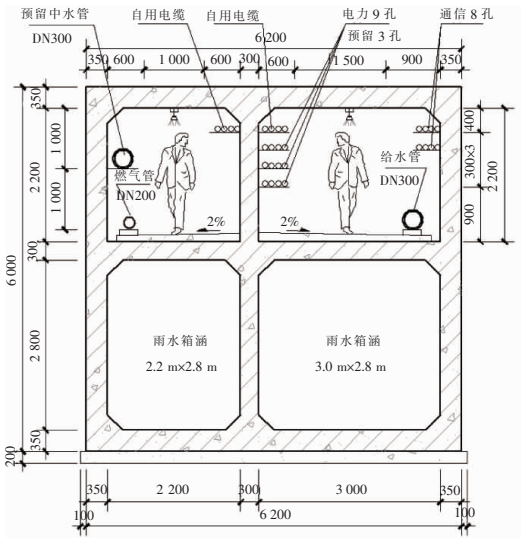


图 2 综合管廊构造

Fig.2 Structure of utility tunnel

管廊结构按照承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计。荷载组合工况主要考虑外压荷载组合和内压荷载组合(雨水箱涵闭水试验荷载组合),边界条件如图 3 所示,在此按照最大覆土 5 m 计,土重度取 20 kN/m<sup>3</sup>,地下水位按照地面以下 7 m 计,雨水箱涵内水压依据工艺提供最高水头 9 m 计。管廊主要位于③粉砂层中,主动土压力系数 Ka 确定为 0.333。底板边界条件采用弹性地基。采用 Midas civil 有限元计算软件建立梁单元闭合框架模型,管廊结构受力计算结果如图 4 所示。

综合管廊结构配筋设计由结构受力较大的部位控制,由图 4 可知,管廊在外压荷载工况下,配筋控制部位为外框角点、顶底板与中墙交界处、顶底板右侧大跨跨中;内压工况下,配筋控制部位是中隔板与外墙及中隔板交界处、中隔板右侧大跨跨中。管廊

各部位均为压弯构件,设计时按照纯弯构件计算,各部位配筋结果如表 2 所示,计算结果表明,综合管廊结构配筋由正常使用极限状态荷载组合的效应设计值控制。

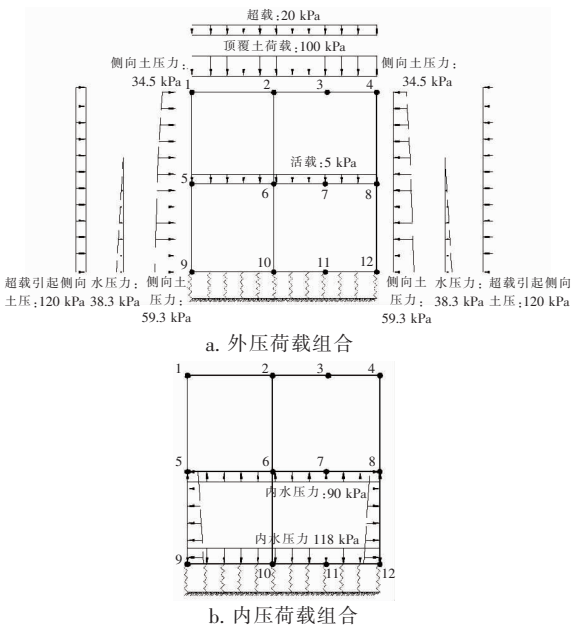


图 3 综合管廊荷载组合

Fig.3 Load combination of utility tunnel

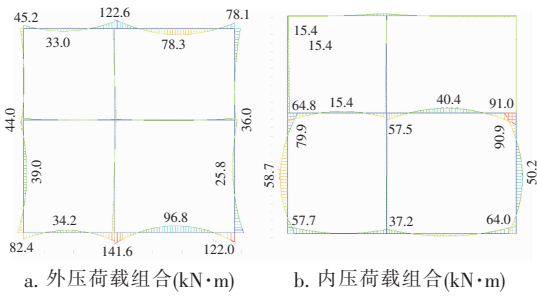


图 4 综合管廊弯矩标准值

Fig.4 Bending moment standard values of utility tunnel

表 2 不利工况下结构配筋计算结果

Tab.2 Calculation results of structural reinforcement under unfavorable conditions

部 位	顶底板 2、10 外缘	顶底板 1、4、9、12 外缘	顶底板 3、11 内缘	外墙 5 内缘	外墙 8 内缘	中隔板 8 下缘	中隔板 7 上缘	中隔板 7 上缘
弯矩标准值/(kN·m)	141.9	122	96.8	79.9	90.9	91	40.4	32.7
弯矩设计值/(kN·m)	191.6	164.7	130.7	107.9	122.7	122.9	54.5	44.1
配筋	Ø20@100	Ø20@100	Ø16@100	Ø14@100	Ø14@100	Ø16@100	Ø14@200	Ø14@200
裂缝/mm	0.193	0.145	0.174	0.098	0.148	0.164	0.173	0.090

2.2 防水设计

地下结构运营后最大的安全隐患之一就是漏水,综合管廊的防水设计是建设各方关注的重点。

综合管廊防水设计等级为二级,基础底埋深为 9.31 ~ 10.99 m,主体结构采用自防水混凝土,抗渗等级为 P8,管廊迎水面采用一层 1.5 mm 厚交叉层



拟,一端与结构框架节点连接,另一端采用边界条件固结模拟地层。地基弹簧的压缩刚度可按式计算(剪切刚度取压缩刚度的1/3):

$$k = KLd \quad (1)$$

式中  $k$ ——地基弹簧的压缩刚度, kN/m

$K$ ——基床系数,参考《城市轨道交通岩土工程勘察规范》(GB 50307—2012),取 30 000 kN/m<sup>3</sup>

$L$ ——按地基弹簧最小间距确定,取 0.292 5 m

$d$ ——纵向的计算长度,取 1 m

计算所得地基弹簧的压缩刚度为 8 775 kN/m,剪切刚度为 2 925 kN/m,计算模型如图 7 所示,本工程管廊为非对称结构,地震作用分别按照左、右两个方向加载。

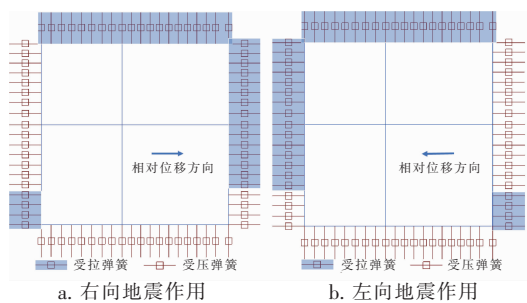


图7 管廊反应位移法计算模型

Fig. 7 Calculation model of response displacement method

### 3.1.2 地震作用

地层的强制位移按照以下公式计算:

$$U(z) = \frac{1}{2} u_{\max} \cos \frac{\pi z}{2H} \quad (2)$$

$$U'(z) = U(z) - U(z_B) \quad (3)$$

式中  $U(z)$ ——地震时深度  $z$  处地层的水平位移, m

$u_{\max}$ ——场地地表最大位移, m

$H$ ——地面至地震作用基准面的距离, m

$U'(z)$ ——深度  $z$  处相对于结构底部的自由地层相对位移, m

$U(z_B)$ ——结构底部深度  $z_B$  处的自由地层地震反应位移

其中地表最大位移  $u_{\max}$  为 0.07g m, 地震作用基准面按照基岩埋深选取, 为 50 m, 具体的计算结果如图 8 所示, 将计算所得的相对位移采用强制位移荷载加至地基弹簧非结构连接端的节点上。相对位

移方向与地震作用方向一致, 按照左、右两个方向加载。

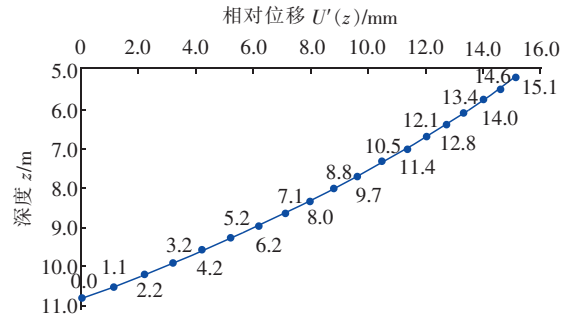


图8 管廊强制位移

Fig. 8 Force displacement of utility tunnel

根据规范, 结构惯性力按照结构的质量乘以最大加速度计算, 即质量  $m \times 0.2g$  加载于管廊结构的质心位置。惯性力方向与相对位移方向一致。

管廊结构周围剪应力作用应该按以下公式计算:

$$\tau_U = \frac{\pi G}{4H} u_{\max} \sin \frac{\pi z_U}{2H} \quad (4)$$

$$\tau_B = \frac{\pi G}{4H} u_{\max} \sin \frac{\pi z_B}{2H} \quad (5)$$

$$\tau_S = (\tau_U + \tau_B) / 2 \quad (6)$$

式中  $\tau_U$ ——结构顶板剪应力, kPa

$\tau_B$ ——结构底板剪应力, kPa

$\tau_S$ ——结构侧墙剪应力, kPa

$z_U$ ——结构顶板埋深, m

$z_B$ ——结构底板埋深, m

$G$ ——地层动剪切模量, 按等效剪切模量取, 为 5 000 kPa

计算所得  $\tau_U$  为 8.7 kPa,  $\tau_B$  为 17.9 kPa,  $\tau_S$  为 13.3 kPa。剪应力方向与相对位移方向一致。

### 3.1.3 计算结果分析

除地震作用外, 管廊其他荷载按照图 3(a) 加载, 分项系数水、土作用取 1.2, 超载作用取 1.4, 地震作用取 1.3。第一次试算, 与顶板和侧墙连接的地基弹簧有受拉弹簧(如图 7 所示), 将受拉弹簧的压缩刚度设置为 0 kN/m 后, 第二次计算地基弹簧均为受压弹簧, 符合土层与结构相互作用的实际情况。

具体的计算结果如图 9、10 所示, 在右向地震作用下, 受力较大的部位是左侧侧墙、中隔板右角点、中隔墙各角点; 在左向地震作用下, 受力较大的部位

是右侧侧墙、中隔板左角点、中隔墙各角点,左、右两向地震作用下结构受力规律相同。与正常使用极限状态下结构受力相比,两种工况的外框架受力均较大,但地震作用工况下隔墙和中隔板承受较大的弯矩和剪力。管廊结构外框架采用表2的配筋能够满足地震作用下强度验算的要求,结构设计截面厚度也均能够满足地震抗剪验算的要求;但是中隔板上缘和中隔墙必须增加配筋以满足抗震强度验算要求,中隔板上缘配筋增至 $\Phi 16@100$ ,中隔墙左右两侧配筋增至 $\Phi 18@100$ ,配筋量分别增加2.6倍和3.3倍。

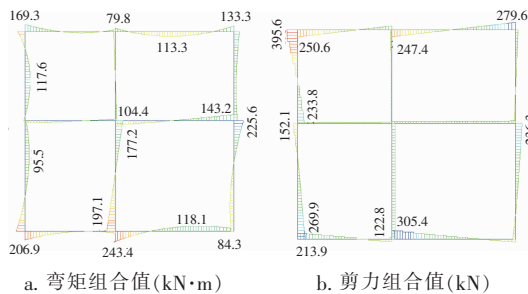


图9 右向地震作用下结构计算内力

Fig. 9 Structural internal force in right earthquake action

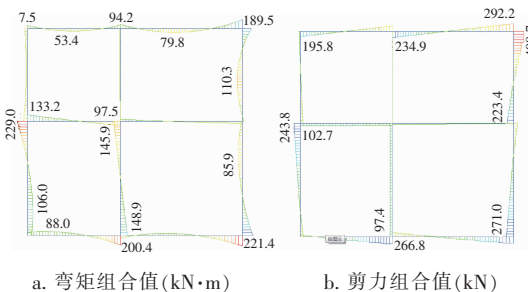


图10 左向地震作用下结构计算内力

Fig. 10 Structural internal force in left earthquake action

分析了地震作用的主要参数与管廊结构内力的影响关系,其中地基土的基床系数 $K$ 值对结构计算内力影响较大。以右向地震作用为例,根据砂性土密实状态的不同, $K$ 值从10 MPa/m取至60 MPa/m,管廊底板与中隔墙交点的计算内力呈非线性变化,如图11所示,尤其是中隔墙位置的计算弯矩和剪力值,增长速率远大于底板计算内力值,而一般的管廊结构设计中,中隔墙截面厚度及配筋设计均相对薄弱。因此,为确保抗震验算的精度,基床系数 $K$ 值的选取除按规范值和经验值外,应建议勘察提供现场试验数据,以提供相对可靠的抗震设计

依据。

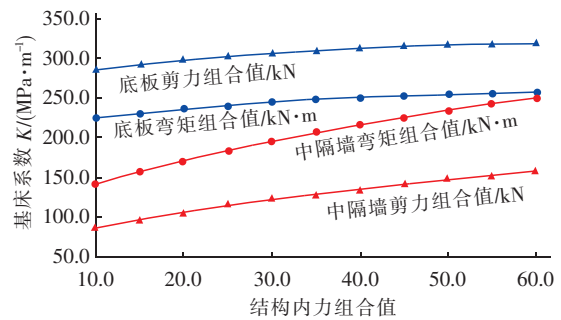


图11 基床系数 $K$ 与结构计算内力变化关系

Fig. 11 Relationship of coefficient of subgrade reaction and structural internal force

### 3.2 地震作用下管廊纵向变位计算

根据《室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》(GB 50032—2003),埋地管道沿纵向其接头是薄弱环节,位移量将由管道接头承担,参照埋地管道纵向变位的计算方法,对本工程管廊变形缝在水平地震作用下的变位进行了验算。本工程管廊埋设的③层粉土实测剪切波速 $V_{sp}$ 为220 m/s;为确保中埋式止水带的安装,管廊在接缝位置壁厚设计为400 mm,管廊设计节段长度为20~25 m,计算取不利情况25 m。

计算公式如下:

$$\gamma_{EHP} \Delta_{pl,k} \leq \lambda_c \sum_{i=1}^n [u_a]_i \quad (7)$$

$$\Delta_{pl,k} = \zeta_t \Delta_{sl,k} \quad (8)$$

式中  $\gamma_{EHP}$ ——水平地震作用分项系数,取1.20

$\Delta_{pl,k}$ ——在剪切波作用下,管道沿管线方向半个视波长范围内的位移标准值,mm

$\lambda_c$ ——半个视波长范围内管道接头协同工作系数,取0.64

$[u_a]$ ——单个节段缝允许位移量,取30 mm

$\zeta_t$ ——沿管道方向的位移传递系数

$\Delta_{sl,k}$ ——在剪切波作用下,沿管道方向半个视波长范围内自由土体的位移标准值,mm

$n$ ——半个剪切波视波长范围内的管道接头数量

根据式(8)计算得到管廊位移标准值 $\Delta_{pl,k}$ 为4.85 mm,则式(7)左边值为5.83 mm,式右边值为27.88 mm,可以满足地震作用下管廊的纵向变位

要求。

#### 4 综合管廊施工

本工程管廊基坑深度为 7 ~ 12.5 m, 基坑采用明挖顺筑法, 基坑开挖范围的土层主要是①杂填土、②粉质粘土和③粉砂。管廊修建于现状道路上, 施工期间要保证道路正常交通, 管廊沿线大多存在单层、多层民房和商铺, 管廊离现状房屋距离为 5 ~ 10 m。考虑到管廊基坑开挖深度和周边环境保护要求, 基坑围护方案可采用钢板桩、钻孔灌注桩和 SMW 水泥土搅拌墙围护, 开挖土层③为密实状的粉砂土, 其下为可塑偏硬状态的粉质黏土层和密实的细砂层, 钢板桩在该类土层中打拔困难, 而钻孔桩围护则需另外增加止水帷幕, 工程造价较高, 因此, 设计选用 Ø850 的 SMW 水泥土搅拌墙围护。本工程基坑为窄坑, 支撑选用型钢内支撑。

松原地区还未有使用 SMW 水泥土搅拌墙的工程案例, 本工程实施后, 基坑稳定性、基坑变形和周边房屋的变形都能够满足要求, 这成为在密实砂质土层地区首次运用 SMW 水泥土搅拌墙的成功案例。

#### 5 结论

通过介绍位于 8 度区的综合管廊结构选型、防水设计、结构计算和管廊施工, 得出以下结论:

① 设计合理选用“田”字型管廊结构, 将管线管廊和雨水箱涵相结合, 既满足入廊管线和工艺排水的要求, 同时又节约了工程施工造价。

② 对变形缝橡胶止水带搭接进行专项设计, 采用铆钉将不锈钢板连接, 采用热熔将橡胶部分连接, 解决了止水带施工搭接不严的难题。

③ 管廊结构除了按照正常使用极限状态和承载力极限状态进行设计外, 同时采用反应位移法进行水平地震验算, 计算结果表明, 管廊外框架的配筋由正常使用极限状态荷载组合的效应设计值控制, 中隔墙和中隔板的配筋由地震作用荷载组合的效应值控制。

④ Ø850 的 SMW 水泥土搅拌墙在管廊基坑的应用, 成为密实砂质土层地区首例成功实施的案例。

#### 参考文献:

- [1] 油新华. 我国城市综合管廊建设发展现状与未来发展趋势[J]. 隧道建设, 2018, 38(10): 1603 - 1611.
- You Xinhua. State-of-art and perspectives of urban

- utility tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(10): 1603 - 1611 (in Chinese).
- [2] 张晏晏, 王经盛. 中山市大断面多舱综合管廊工程设计探讨[J]. 中国给水排水, 2018, 34(18): 48 - 52.
- Zhang Yanyan, Wang Jingsheng. Discussion on design of utility tunnels with large section and multi-module in Zhongshan City[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(18): 48 - 52 (in Chinese).
- [3] 赵丹阳. 地下综合管廊交叉节点地震反应分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Zhao Danyang. Seismic Response Analysis of Cross Joint in the Utility Tunnel[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017 (in Chinese).
- [4] 缪冬建. 乌市某综合管廊结构设计探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2017(7): 322 - 327.
- Miao Dongjian. Discussion on structural design of utility tunnel in Urumqi[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(7): 322 - 327 (in Chinese).
- [5] 闫钰丰, 黄强兵, 杨学军, 等. 地下综合管廊穿越地裂缝变形与受力特征研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1203 - 1210.
- Yan Yufeng, Huang Qiangbing, Yang Xuejun, et al. Research on the deformation and force characteristics of underground utility tunnel crossing ground fissure[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(5): 1203 - 1210 (in Chinese).
- [6] 夏洪薇, 郭路伟, 龙博. 复杂地下空间结构中综合管廊优化设计探讨[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 69 - 72.
- Xia Hongwei, Guo Luwei, Long Bo. Discussion on optimal design of utility tunnel with complex underground space construction conditions[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 69 - 72 (in Chinese).
- [7] 施有志, 华建兵, 李秀芳, 等. 反应位移法在地下综合管廊抗震设计中的应用[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2018, 48(6): 1785 - 1796.
- Shi Youzhi, Hua Jianbing, Li Xiufang, et al. Application of response displacement method in seismic design of underground utility tunnels[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2018, 48(6): 1785 - 1796 (in Chinese).
- [8] 王璐. 地下建筑结构实用抗震分析方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- Wang Lu. Study on Practical Seismic Analysis Method for Underground Structures[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011 (in Chinese).

- [9] GB/T 51336—2018, 地下结构抗震设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.  
GB/T 51336—2018, Code for Seismic Design of Urban Underground Structures[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018 (in Chinese).
- [10] 张勇, 张立. 城市地下综合管廊防水设计要点综述[J]. 中国建筑防水, 2017(24): 14—19.  
Zhang Yong, Zhang Li. Reviews on main points of waterproofing design of urban underground utility tunnel [J]. China Building Waterproofing, 2017(24): 14—19 (in Chinese).
- [11] 张浩, 李小溪. 明挖现浇综合管廊防水设计与施工技术探讨[J]. 中国建筑防水, 2018(21): 16—21.  
Zhang Hao, Li Xiaoxi. Waterproofing design and construction of open-cut and cast-in-place utility tunnel [J]. China Building Waterproofing, 2018(21): 16—21 (in Chinese).
- [12] 王成, 王旭, 胡浩方. 浅埋暗挖管廊无支架施工技术研究[J]. 公路, 2018(12): 234—236.  
Wang Cheng, Wang Xu, Hu Haofang. Non-support construction research of shallow buried covered excavation utility tunnel [J]. Highway, 2018(12): 234—236 (in Chinese).
- [13] 朱莺凤. 某综合管廊顶管工程设计[J]. 城市道桥与防洪, 2018(8): 368—371.  
Zhu Yingfeng. Pipe-jacking design of utility tunnel[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2018(8): 368—371 (in Chinese).
- [14] 陈苏. 基于 BIM 及物联网的城市地下综合管廊建设[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(6): 1445—1451.  
Chen Su. Urban underground composite pipe gallery construction based on BIM and IOT technology [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(6): 1445—1451 (in Chinese).



作者简介: 周敏(1986—), 女, 江西吉安人, 硕士, 工程师, 主要从事地下结构设计工作。

E-mail: 563594094@qq.com

收稿日期: 2019-01-15

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命