

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2018.02.022

预制矩形箱涵受力性能模拟及其潜在的破坏模式

王述红¹, 阿力普江·杰如拉¹, 王鹏宇¹, 刘伟华²

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 中建五局土木工程有限公司, 湖南长沙 410004)

摘要: 以沈阳市浑南新城区综合管廊工程预制拼装施工段为研究背景, 针对城市地下综合管廊预制矩形箱涵单个管节, 通过通用有限元分析软件 ABAQUS 进行数值模拟, 研究分析其在不同埋深下的结构变形和应力分布规律。建模中为了尽可能地贴近预制箱涵的实际受力情况, 参照实际工程应用对其进行了配筋。本模型中通过改变施加于顶板和侧壁板的荷载大小来模拟埋深的变化; 对综合管廊顶板施加均布压力, 对侧壁板施加线性变化的侧土压力, 最终分析预制箱涵在不同埋深下的结构变形和应力分布, 并提出结构安全隐患存在的部位和其潜在的破坏形式, 为复杂条件下预制综合管廊的设计和施工提供理论参考。

关键词: 预制矩形箱涵; 顶板; 侧壁板; 结构变形; 应力集中

中图分类号: TU 990.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2018)02-0260-06

Mechanics Performance Analysis of Precast Rectangle Box Culvert and Damage Prediction of Key Parts

WANG Shu-hong¹, JIERULA Alipujian¹, WANG Peng-yu¹, LIU Wei-hua²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. CCFEB Civil Engineering Co., Ltd., Changsha 410004, China. Corresponding author: WANG Shu-hong, E-mail: wangshuhong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Taking the prefabricated construction section of the Hunnan New Development Area utility tunnel construction in Shenyang, China as research background, the numerical simulations of structural deformation and stress distribution of single precast rectangle box culvert at different burial depths were carried out through the general finite element analysis software ABAQUS. In order to modeling the actual stress of the precast rectangle box culvert as accurately as possible, the reinforcement was carried out according to the actual engineering application. This model simulated the different buried depths by changing the load of roof and side wall, where a uniform pressure was loaded on the roof and the lateral pressure varied linearly was loaded on the side wall. Finally this paper analyzed the structural deformation and stress distribution of precast rectangle box culvert at different buried depths, pointing out the existing structural safety problems and potential failure modes, to provide a theoretical reference for the design and construction of utility tunnel engineering.

Key words: precast rectangle box culvert, roof, side wall, structural deformation, concentration of stress

城市地下综合管廊(urban utility tunnel, UUT), 又称城市共同沟, 是指将电力、通讯、给水、燃气等多种市政管线集中安置在人工建造的地下空间中, 实现对其统一管理的一种符合城市发展需求的现代化基础设施系统^[1-4]。

UUT 施工方法主要有两种: 现场浇筑混凝土施工方法(现浇施工法)和预制拼装施工方法(预制施工法)。相对现浇施工法而言, 预制施工法工期短, 费用少, 工序简便, 结构性能好, 并且节能环保^[5-7]。预制施工法常用的结构断面形式有圆形

收稿日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金地区重点资助项目(U1602232); 国家自然科学基金资助项目(51474050, 51179031); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLGP2012K009, SKLGP2014K011); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划项目(LN2014006)。

作者简介: 王述红(1969-), 男, 江苏泰州人, 东北大学教授, 博士生导师。

截面和矩形截面两种. 由于圆形截面空间利用率不如矩形截面, 在很多综合管廊工程中矩形截面综合管廊逐渐得到了设计单位的青睐. 预制混凝土矩形截面综合管廊(也称预制箱涵)在上海世博园区综合管廊工程和沈阳浑南新城区综合管廊工程得到了示范应用并取得了很好的经济效应和社会效应.

由于预制箱涵的地下受力特性不同于地表构筑物, 特别是不同埋深对于工程造价和箱涵的设计影响比较大, 主要是不同埋深、不同邻近构筑物和不同地面载荷导致矩形箱涵的受力性能复杂; 而对复杂城区管廊埋深位置的确定, 还缺少深入分析.

薛伟辰等^[8]通过足尺模型实验对综合管廊进行力学研究, 分析其受力特点和破坏形式. 廖四海等^[9]通过有限差分软件 Flac^{3D}对综合管廊埋深进行数值模拟研究, 分析了埋深对综合管廊几个关键点的影响. 这些文献主要侧重于模型实验和关键节点的力学性能分析, 但对综合管廊的埋置

深度缺乏有效的确定方法.

本文基于前人研究, 借助有限元分析软件 ABAQUS, 对预制箱涵在不同埋深受力状态下的力学行为进行数值模拟, 分析其结构变形特点和应力分布规律, 并提出结构存在安全隐患的区域和可能存在的破坏模式.

1 建立计算模型

1.1 概述

本文以沈阳市浑南新城区综合管廊工程为研究背景, 预制箱涵的单个管节为研究对象建立三维实体模型, 其长、宽和高分别为 1.5、3.2 和 2.8 m, 管廊壁厚为 0.3 m. 本模型参照实际工程进行钢筋配置, 见图 1. 对管廊顶板和底板施加均布压力, 两侧壁板施加均匀变化的线性侧向压力, 对地板两端设计铰支座约束. 应用闭合框架模型对结构进行内力计算.

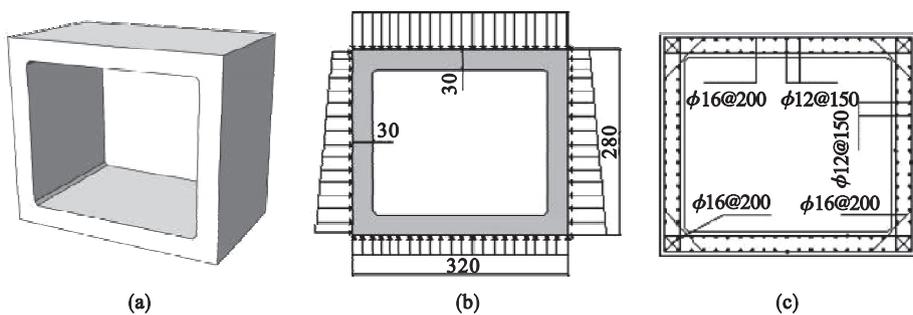


图1 模型详图

Fig. 1 Detail view of model

(a) —模型三维图; (b) —横断面示意图(单位: cm); (c) —配筋图.

1.2 基本假定

①底层较为坚硬, 基地反力直线分布^[10]; ②不考虑土与结构共同作用, 将不同埋深下的土压力直接施加到模型上面; ③除了覆土压力和结构自重无其他作用; ④本模型覆土假定为单层黏性土, 各项指标按黏性土参考值来确定.

1.3 荷载设计^[10]

1) 顶板荷载. 预制箱涵在不同埋深下, 上层覆土自重对顶板所施加的压力荷载为

$$P_{\text{顶}} = h \cdot r.$$

式中: h 为上层覆土厚度; r 为土重度, 本模型假定覆土为单层黏性土, 根据各黏性土重度参考值, 拟取 $r = 20 \text{ kN/m}^3$.

2) 底板荷载. 预制箱涵底板所受的反力为顶板所受荷载与结构自重之和:

$$P_{\text{底}} = m/s + P_{\text{顶}}.$$

式中: m 为结构总质量; s 为底板面积; $P_{\text{顶}}$ 为结构顶板荷载.

3) 侧壁(分为上端和下端)荷载:

$$P_{\text{上端}} = rhK,$$

$$P_{\text{下端}} = r(h + H)K.$$

式中: r 为土重度(本模型拟取 $r = 20 \text{ kN/m}^3$), h 为上层覆土厚度, H 为结构总高度, K 为静止侧压力系数(根据黏性土静止侧压力系数参考值, 拟取 $K = 0.5$).

综合管廊属于浅埋地下结构^[11], 一般综合管廊工程埋深在 1 ~ 8 m 之间, 因此, 本模型埋深从 1 ~ 8 m, 每隔 1 m 取一组数据进行模拟计算. 在不同埋深下的荷载计算值见表 1.

表 1 荷载设计表
Table 1 Load design

埋深 h/m	顶板荷载 $P_{顶}/kPa$	底板荷载 $P_{底}/kPa$	侧壁荷载 $P_{上端}/kPa$	侧壁荷载 $P_{下端}/kPa$
1	20	45	10	38
2	40	65	20	48
3	60	85	30	58
4	80	105	40	68
5	100	125	50	78
6	120	145	60	88
7	140	165	70	98
8	160	185	80	108

2 模拟结果与分析

2.1 模型变形分析

通过有限元分析软件 ABAQUS 对所建的模

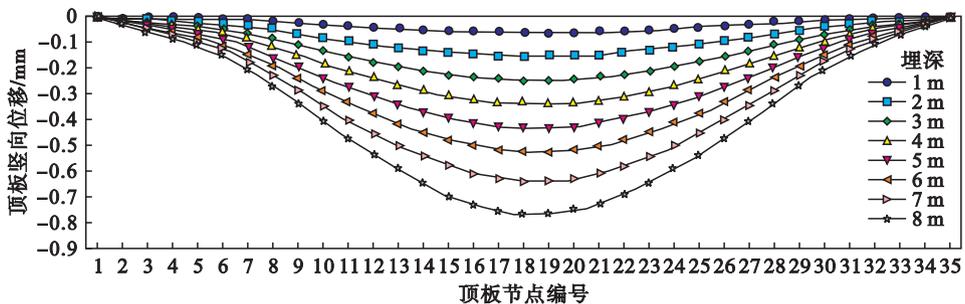


图 2 顶板竖向挠度随埋深的变化曲线

Fig. 2 Vertical deflection curves of the roof along with the buried depth

2.1.2 侧壁板变形分析

用同样的方法,在侧壁板中从上到下等距抽取 31 个节点,提取每个节点的横向位移,画出其横向位移变化曲线,见图 3(图中正号表示侧壁板向外凸,负号表示侧壁板向内凹).从图 3 可以看出,预制箱涵侧壁板变形近似波浪形,上端凸出部分变形最明显,变形量最大,在下端恢复正常.这现象与薛伟辰等^[8]得出的实体实验结果吻合.

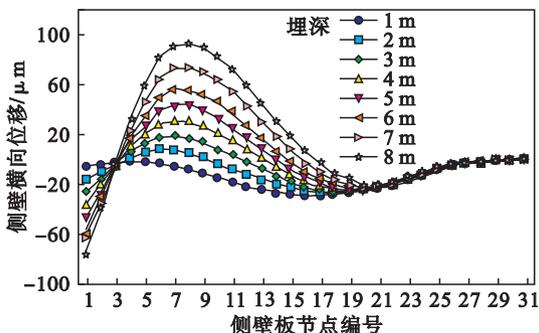


图 3 侧壁板横向位移变化曲线

Fig. 3 Transverse displacement curves of the side wall

预制箱涵内置钢筋骨架变形与管廊变形几乎

型进行结构变形分析.从模型结构变形特点可以看出模型顶板和侧壁板变形比较显著.因此,本文将顶板与侧壁板变形进行详细分析.

2.1.1 顶板竖向位移分析

借助有限元软件 ABAQUS,将顶板横截面从左到右等距分成 34 个单元,每个单元两端设有两个节点,共有 35 个节点,提取每个节点的竖向位移,画出其竖向位移曲线,见图 2(图中正号表示顶板向上凸,负号表示顶板向下凹).从竖向位移曲线可以看出,预制箱涵顶板变形近似抛物线形,从中间开始向内凹,中间竖向位移最大、两端竖向位移最小.随着埋深的增加,顶板竖向位移也逐渐增大,而且,随着埋深的增加中间部位的竖向位移变化量比两端变化大得多,说明顶板中间部位对埋深或者顶板竖向荷载比较敏感.

一致,这里不再赘述.

2.2 模型应力分析

由图 4 可以看出,顶板中部、四个角部和侧壁板上端是应力集中危险区域,因此本文主要分析顶板和侧壁板的应力分布.

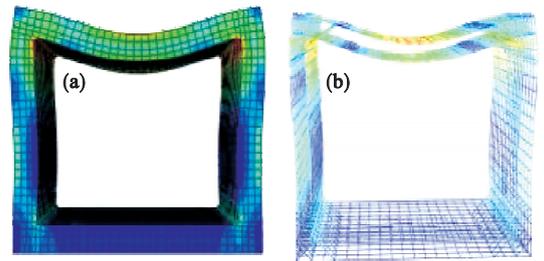


图 4 模型应力-应变云图

Fig. 4 Stress-strain contours of the model

(a)—混凝土应力-应变云图;
(b)—钢筋骨架应力-应变云图.

2.2.1 顶板混凝土应力分析

根据网格划分,取顶板外侧(最上层)混凝土单元组和顶板内侧(最下层)混凝土单元组为研究对象,分别提取各层每单元混凝土的应力,分析

其在不同埋深下的应力变化情况. 顶板从左到右, 每个混凝土单元编号从 1 到 35.

1) 顶板外侧(最上层)混凝土应力分析.

在周围土压力荷载作用下顶板外侧(最上层)混凝土有三个区域出现应力集中现象, 见图 5. 其中 A 区域和 C 区域主要以拉应力为主, B 区域(中间区域)主要以压应力为主, B 区域的应力大于其他两区域的应力. 随着埋深的增加, 顶板外侧(最上层)混凝土的应力逐渐增大, 其中应力集中区域的应力增大较为显著, 见图 6(图中应力不分正负, 取绝对值).

顶板外侧(最上层)混凝土破坏形式预测: 随着埋深的增加, 顶板外 A 区域和 C 区域混凝土出现开裂, B 区域的混凝土出现挤压. 其中 A 和 C 区域混凝土开裂导致地下水渗透现象.

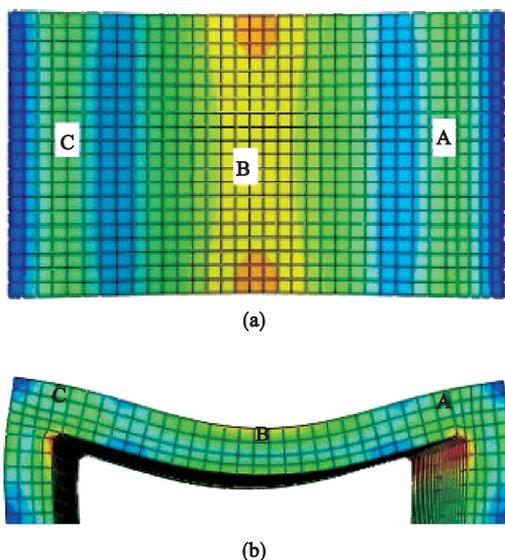


图 5 顶板应力云图

Fig. 5 Stress nephogram of the roof

(a) —顶板正面应力云图; (b) —顶板横断面应力云图.

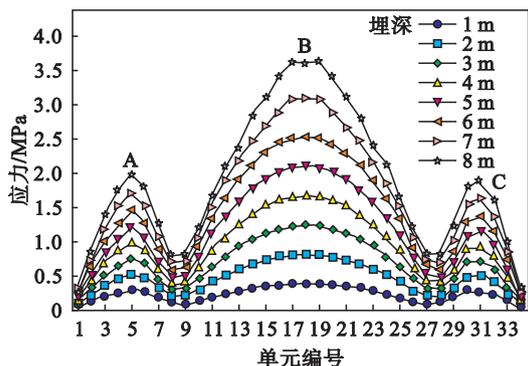


图 6 顶板外侧混凝土应力值变化曲线

Fig. 6 Concrete stress curves of outside the roof

2) 顶板内侧(最下层)混凝土应力分析.

在周围土压力荷载作用下顶板混凝土内侧两

端角部(A 和 C 区域)和中间(B 区域)出现应力集中, 其中两端角部区域以压应力为主, 中部区域以拉应力为主; 随着埋深的增大, 两端角部和中部区域的应力明显增大, 其中角部区域的应力增大得比中部区域快, 见图 7(图中应力不分正负, 取绝对值).

顶板内侧(最下层)混凝土破坏预测: 随着埋深的增加, 顶板内侧中间区域混凝土出现开裂, 逐渐向两侧延伸. 角部区域混凝土出现压碎破坏.

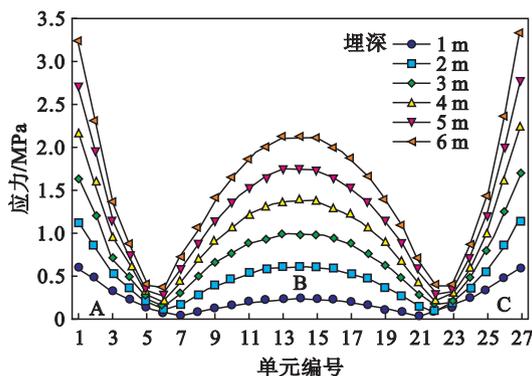


图 7 顶板内侧混凝土应力值变化曲线

Fig. 7 Concrete stress curves of inside the roof

2.2.2 侧壁板混凝土应力分析

1) 侧壁板外侧混凝土应力分析.

利用同样的方法, 将模型侧壁板混凝土分为外侧和内侧, 分别对其应力分布进行分析. 侧壁板外侧混凝土出现两个应力集中区域: D 和 E 区域, 见图 8. 侧壁板从上到下, 每个单元编号从 1 到 30, 取每个单元的应力值, 画其应力曲线(图中应力不分正负, 取绝对值), 见图 9.

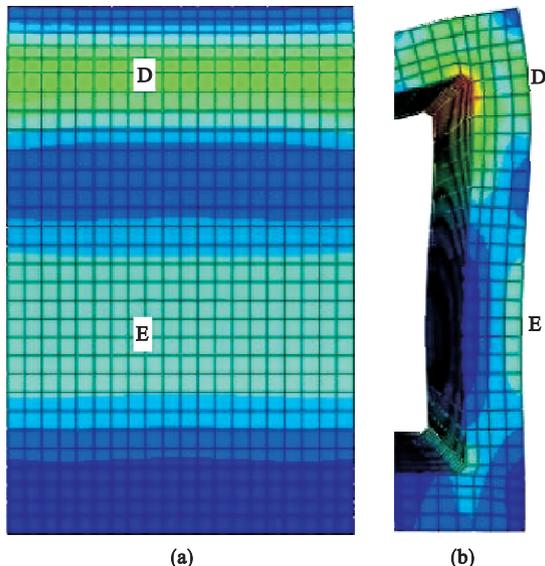


图 8 侧壁板应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of the side wall

(a) —侧壁板正面应力云图; (b) —侧壁板横断面应力云图.

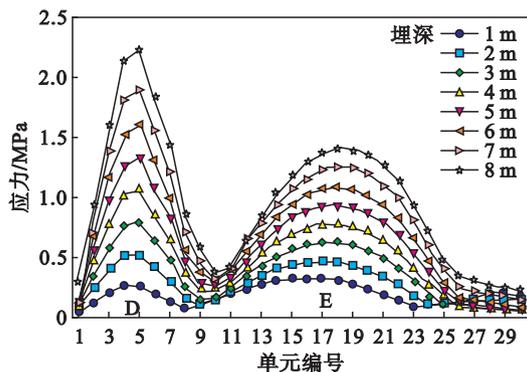


图 9 侧壁板外侧混凝土应力值变化曲线

Fig. 9 Concrete stress curves of outside the side wall

从图 9 看出,随着埋深的增加,应力也开始逐渐增大,其中 D 区域和 E 区域的应力增长速度较快. D 区域主要以拉应力为主, E 区域主要以压应力为主. D 区域应力大于 E 区域的应力.

侧壁板外侧混凝土破坏预测:随着埋深的增大,侧壁板外侧 D 区域混凝土开始向外凸出,出现开裂现象,导致地下水从 D 区混凝土开裂处渗透到管廊结构内部.

2) 侧壁板内侧混凝土应力分析.

从图 10 可以看出,侧壁板内侧上端角部区域混凝土应力高度集中,然后往下慢慢减少,到了低端角部区域应力稍微增大.随着埋深的增大,上端角部区域混凝土应力显著增大,主要是以压应力为主.

侧壁板内侧混凝土破坏预测:随着埋深的增大,结构上端角部区域混凝土应力激增,可能导致侧壁板角部区域混凝土受到挤压,发生压碎破坏.

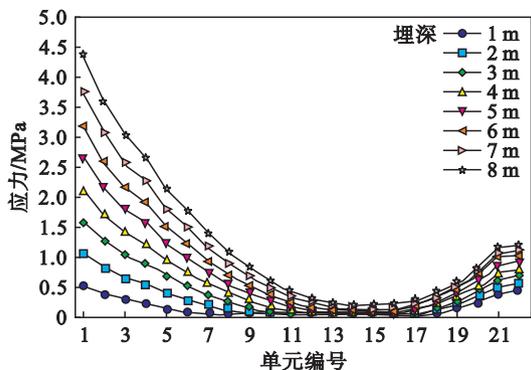


图 10 侧壁板内侧混凝土应力值变化曲线

Fig. 10 Concrete stress curves of inside the side wall

结构内置钢筋骨架应力变化规律与上述规律相似,在此不再赘述.

3 数值模拟与实体模型实验对比

因为数值模拟计算本身具有局限性,为了验证本文数值模拟实验的可靠性,作者查阅国内相关实体模型实验进行对比分析.本文数值模拟实验在建模和加载方式上与同济大学薛伟晨等^[8]做的 1:1 实体模型实验有相似之处,因此,将本数值模拟实验结果与文献[8]实体模型实验进行了简单对比,并论证其可靠性.

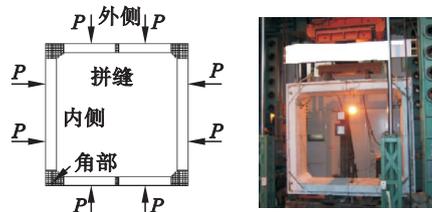


图 11 同济大学实体模型实验加载示意图

Fig. 11 Entity model test loading diagram in Tongji University

3.1 顶板变形与破坏模式

数值模拟实验中,顶板从中间开始向内凹,逐渐达到最大值,并且随着埋深增大,中间的变形比两侧明显大,形成抛物线形变形.在顶板中间截面出现应力集中.

在文献[8]实体模型实验中,随着荷载的加载,上板接口拼缝处开始开裂,随着荷载的增大,拼缝张开量逐渐增大,受拉钢筋开始屈服,最后受压区混凝土压碎破坏.从所述实体实验破坏模式可以看出,本模型所得的结构变形与应力分布情况与所述实体实验基本一致,可以验证数值模拟所得结果的可靠性.

3.2 侧壁板变形与破坏模型

如图 8 所示,数值模拟实验中,侧壁板上端处向内凹,紧接着 D 区域开始向外凸,然后 E 区域向内凹,最后到下端脚处达到原位置,形成波浪形变形.其中 D 区域向外凸处的变形量最大并出现高度的应力集中现象,其位置刚好处在侧壁板上端加腋区.

文献[8]实体模型实验中,随着荷载的加载,首先在侧壁板上端部加腋区外侧混凝土出现开裂,且开裂区域逐渐向侧壁板跨中延伸.这现象完全符合本模型所得出的变形与应力分布结果,可以验证本模型所得结果的可靠性.

4 结 论

1) 埋深对预制箱涵的影响是不可忽视的. 设计不合理的埋深轻则引起混凝土开裂, 重则引起结构破坏. 因此, 设计时对预制箱涵埋深的验算是不可缺少的.

2) 综合管廊预制箱涵顶板在竖向荷载作用下的变形近似抛物线形, 中部竖向位移最大. 随着埋深增加, 顶板变形越来越大, 其中顶板中部区域竖向位移变化得最快, 对埋深(或者顶部荷载)最敏感.

3) 综合管廊预制箱涵侧壁板在周围荷载作用下发生波浪形变形, 其中侧壁板上半部分变形较大, 下半部分变形较小. 随着埋深增加, 侧壁板变形越来越大, 其中上端往外凸出部分变形最大, 对埋深最敏感.

4) 综合管廊预制箱涵在上层覆土荷载作用下发生结构应力重分布. 顶板在上层覆土荷载作用下出现以拉应力为主的 A、C 区域, 以压应力为主的 B 区域; 侧壁板出现以拉应力为主的 D 区域, 压应力为主的 E 区域. 这些区域的应力随着埋深的增加而出现应力剧增的趋势.

5) 随着预制箱涵埋深的增加, 顶板 A 区域、C 区域与侧壁板 D 区域容易出现表面混凝土开裂, 导致地下水渗透现象, 因此, 设计时应考虑且采取对应的预防措施.

参考文献:

- [1] Hunt D V L, Nash D, Rogers C D F. Sustainable utility placement via multi-utility tunnels [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2014, 39(sup1): 15 - 26.
- [2] Chen J, Jiang L, Li J, et al. Numerical simulation of shaking

table test on utility tunnel under non-uniform earthquake excitation [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2012, 30(4): 205 - 216.

- [3] Julian C P, Julian C E. An analysis of utility tunnel viability in urban areas [J]. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2006, 25(1): 11 - 19.
- [4] Julian C P, Jorge C E, Calvo V. Criticality and threat analysis on utility tunnels for planning security policies of utilities in urban underground space [J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(11): 4707 - 4714.
- [5] Marshall A M, Haji T. An analytical study of tunnel-pile interaction [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2015, 45: 43 - 51.
- [6] Julian C P, Jorge C E. Human factors engineering in utility tunnel design [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2001, 16(3): 211 - 215.
- [7] Chen J, 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.
- [8] 薛伟辰, 胡翔, 王恒东. 上海世博园区预制预应力综合管廊力学性能实验研究[J]. *特种结构*, 2009, 26(1): 105 - 108. (Xue Wei-chen, Hu Xiang, Wang Heng-dong. Experimental study on mechanical properties of precast prestressed utility tunnel in Shanghai World Expo Park[J]. *Special Structures*, 2009, 26(1): 105 - 108.)
- [9] 廖四海, 黄立夫, 李雄, 等. 综合管廊埋深数值分析[J]. *混凝土与水泥制品*, 2015(10): 32 - 34. (Liao Si-hai, Huang Li-fu, Li Xiong, et al. Numerical analysis of buried depth of utility tunnel[J]. *China Concrete and Cement Products*, 2015(10): 32 - 34.)
- [10] 荣哲, 孙玉品. 城市综合管廊设计与计算[J]. *工业建筑*, 2013, 43(sup1): 230 - 232. (Rong Zhe, Sun Yu-pin. Structural design and calculation of municipal pipe gallery[J]. *Industrial Construction*, 2013, 43(sup1): 230 - 232.)
- [11] Wang S H, Ni P P, Guo M D. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2013, 38: 357 - 367.