

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2019.0026

郝红红,武永新,杨伟超. 新型多功能城市除涝结构地下综合体开发[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(1): 193-201. HAO H H, WU Y X, YANG W C. The development of underground complex as a new multi-functional urban waterlogging control structure[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(1): 193-201. (in Chinese)

新型多功能城市除涝结构地下综合体开发

郝红红,武永新,杨伟超

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津 300350)

摘要:在我国快速城市化大背景下,“城市看海”景象频繁上演,城市内涝问题日趋突出。以往缓解城市内涝的工程措施主要致力于提高城市排水系统的设计标准,视角单一,仅关注内涝问题,缺乏并行解决城市诸多问题的考虑。据此提出一种新型多功能城市除涝结构——地下综合体,拟解决城市内涝、交通拥挤、管线入廊三大城市问题。地下综合体管廊层空间的预留可有效避免由于敷设、维修各类管线造成的道路重复开挖;交通层各运行期的不同使用功能可有效缓解城市内涝及交通压力。首次提出地下综合体结构方案,运用 ABAQUS 有限元软件建立三维实体模型,并进行静力分析;通过案例运用,结合水动力模型,分析地下综合体除涝效果。结果表明:地下综合体在两种运行期下竖向位移及应力均较小,结构受力合理,局部拉应力集中部位需适当加强配筋;新型除涝结构措施可显著改善研究区域内涝现状。

关键词:城市除涝;地下综合体;多功能;有限元;水动力

中图分类号:TV143;TV87 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The development of underground complex as a new multi-functional urban waterlogging control structure

HAO Honghong, WU Yongxin, YANG Weichao

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: With the rapid urbanization of China, urban pluvial floods and waterlogging become increasingly frequent and serious. Previous engineering measures to alleviate urban waterlogging mainly focused on improving the design standards of urban drainage system, lacking consideration of other related problems. Thus, we proposed a new multifunctional urban waterlogging control structure—an underground complex—to tackle the three urban problems: waterlogging, traffic congestion, and laying pipes & wires in the utility tunnel. The reserved room of the utility tunnel layer in the underground complex can effectively avoid repeated excavation of roads due to installation and repair of various pipelines. The different operation functions of the traffic layer can effectively relieve the urban waterlogging and traffic pressure. We put forward an underground complex structure scheme for the first time, established its 3D numerical model with ABAQUS, and conducted static analysis. The waterlogging control effect of the underground complex was analyzed based on the hydro-dynamic model and a case study. The results showed that, the mechanical properties of the structure were reasonable; the vertical displacement and stress were small in the two operating periods. However, reinforcement should be applied in the tensile stress concentration area. The underground complex can greatly alleviate the waterlogging situation of the study area.

Key words: urban waterlogging; underground complex; multifunction; finite element; hydrodynamic

收稿日期:2018-08-11 修回日期:2018-11-06 网络出版时间:2018-11-20

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181116.1520.006.html>

作者简介:郝红红(1992—),女,山西吕梁人,主要从事防洪减灾及水工结构方面研究。E-mail:1435599373@qq.com

通信作者:武永新(1962—),男,天津人,教授,博士,主要从事防洪减灾及水工结构方面研究。E-mail:3293677868@qq.com

洪涝灾害是当今世界最主要又频繁发生的灾害之一,普遍受世界各国关注。我国地域辽阔,受季风气候影响,年内降雨差异较大,暴雨洪涝灾害突出,是世界上洪涝灾害最严重的国家之一^[1-2]。全国多个城市出现雨天“看海”景象,造成巨大的经济损失,严重威胁人民生命财产安全。目前国内外解决城市内涝的措施主要分为工程措施和非工程措施。其中国内工程措施主要有:叶斌等^[3]提出降低地面硬化率,加强排水管网的建设,王峰等^[4]提出加强对已有排水设施的改造、维护及管理,冯杰等^[5]提出设置强排泵站、兴修人工调洪设施,李婕^[6]提出改造旧排水管道,卢炯平等^[7]提出建设大深排水隧道等,而国外主要有将可用的下水道储存容量作为一种洪水和下水道溢出的缓解措施^[8],修建地下蓄水设施^[9-10]等。以上解决问题的思路多仅限于解决城市内涝问题,缺乏并行解决城市诸多问题的考虑。在城市化大背景下,交通拥挤、管线维修中的“拉链马路”问题以及城市目前存在的其他问题愈演愈烈,给城市形象造成恶劣影响,一定程度上使得城市功能瘫痪^[11-15]。同时,在非汛期,整个城市的排水系统基本都处于非饱和工作状态,造成了极大的资源浪费。故开发并行解决城市诸多问题的除涝设施十分必要。据此,本文提出兼有防洪除涝、缓解交通、优化管廊的新型多功能城市除涝结构——地下综合体。本文基于 ABAQUS 对地下综合体进行三维有限元静力分析,结合水动力模型,分析其除涝效果,旨在说明该新型防洪工程措施的可行性和有效性。

1 地下综合体的结构方案

1.1 结构形式及施工方法

地下综合体由底层交通层和顶层综合管廊层两部分组成,主要包括侧墙、顶板、底板、综合管廊层与交通层分割面板、综合管廊层隔板、路侧带、遇水报警器,见图 1,综合管廊层横断面为单层三箱,可根据实际情况敷设市政各类管线^[16],交通层在两种运行期的功能分别为城市地下三车道交通洞、城市汛期储蓄涝水设施。遇水报警器用于发出信号,以停止给地下综合体底层注水。根据地下道路设置习惯,地下综合体底层设置路侧带、路缘带,以保证其正常运行^[17]。其施工工序为:(1)就近选定预制场,预制每节长度为 1.5 m 的 C60 钢筋混凝土管,并将其用履带吊转运至临时堆放场。(2)沿地下综合体的拟定铺设路线每隔 300 m 开挖顶管施工所需要的工作井。(3)施工同时从两个工作井相向顶进,两端各顶进 150 m。(4)每段顶进完成后,将设备拆

除。(5)重复(3)、(4)工序直到施工完成。(6)在地下综合体交通层两侧修建 0.75 m×0.15 m(宽×高)的路侧带。(7)修建地下综合体交通层的出入口,设置拦放水活动坡墩。(8)交通层进出口的顶部安装遇水报警器,见图 1。(9)地下综合体底板上表面、两侧侧墙、隔板下表面采取一定的防水措施。

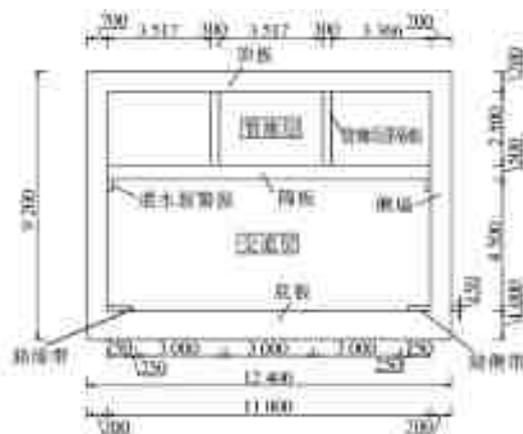


图 1 地下综合体横剖面(单位:mm)

Fig. 1 Horizontal section of underground complex (Unit:mm)

1.2 运行方案

地下综合体工作原理:一般运行期,进出口拦/放水活动坡墩处于关闭状态,管廊层用于铺设市政管线,交通层为城市地下三车道交通洞,限高 4.5 m,用于缓解城市交通压力。根据汽车的高度(大约 25~35 cm),选用临界值 30 cm,作为城市道路封闭的淹没水深^[18],本文充分考虑行车安全性选取 15 cm 作为城市道路封闭的淹没水深,也是转换地下综合体交通层使用功能的路面积水临界值。特殊运行期,当研究区域主干道积水超过 15 cm,严重影响地面交通时,地下综合体的交通层转换使用功能,用于储蓄涝水,管廊层使用功能同一般运行期,此时开启进出口的拦/放水活动坡墩,交通层开始蓄水,直到遇水报警器报警,关闭活动坡墩,停止给交通层注水。极端降雨天气结束后,将交通层的蓄水经过处理加以利用或抽排。

1.3 特征及优势

较以往城市除涝措施,本文提出的多功能除涝地下综合体优势如下。

(1)可提高城市的雨水容纳能力和内涝洪水的蓄滞能力,极端降雨天气可用于紧急除涝,在较短时间内较大程度地改善城市内涝现状。

(2)地下综合体管廊层空间的预留可将雨水、污水、热力、给水、中水等各类管线集于一体,管线可在地下综合体管廊层内架设铺装,且检修人员可进入管廊层维修维护,有效避免了由于敷设、维修各类管

线造成的道路重复开挖,有效改善城市“拉链马路”问题,一定程度上对提升管线安全水平和城市总体形象、创造城市和谐环境起到了积极推动作用。

(3)地下综合体交通层在一般运行期为城市地下三车道交通洞,结合区域交通主干道合理设置出入口,实现对机动车的分流、净化地面交通的目的,解决机动车无效流动问题,可在一定程度上缓解城市交通压力。

(4)地下综合体基本不占用城市地面建设空间,节约城市有限的土地资源,该结构并行解决城市内涝、城市交通、管线入廊三大城市问题,充分发挥其在除涝、交通、管廊布局等方面的功能优势。

1.4 铺设路线选取原则

选取城市内涝严重区域,结合该区域交通拥挤路段,选取能够兼顾区域内涝、交通拥挤的铺设路线,根据内涝问题的严重程度,铺设一组或多组地下综合体。

2 有限元模型及静力分析

2.1 模型建立

本文基于 ABAQUS 有限元软件,建立三维有限元计算模型。

(1)计算区域。岩土工程的分析区域实质上是无限大的,有限元分析建模中习惯采用截断边界的

方法,一般来说,计算区域范围应不小于结构轮廓尺寸的 3~4 倍^[19]。故计算区域选取为:模型沿地下综合体轴线方向取 150 m,水平方向左右向外各取 19 m,竖直方向上下各取 12.85 m,地基土体总厚度为 34.9 m,总宽度为 50.4 m,泥浆层厚度为 30 mm,见图 2。

(2)坐标系。选用笛卡尔坐标系,以地下综合体交通层底板顶面左侧与侧墙内侧相交点为原点, x 轴为地下综合体轴线方向, y 轴为其横断面方向, z 轴为竖直方向。

(3)边界条件及相互作用。地基的下表面采用全约束,四周表面为水平约束,上表面为自由表面;混凝土结构与泥浆层以及泥浆层与土体之间的相互作用,设置为面面接触,有限滑移,摩擦系数设置为 0.40。采用 Embedded 技术模拟钢筋和混凝土之间的相互作用。

土体、地下综合体及泥浆层选用 C3D8R 实体单元进行网格划分,土体单元总数为 86 490 个,地下综合体单元总数为 40 680 个,泥浆层单元总数为 6 750 个。模型求解过程中考虑几何非线性;模型中的分层土体采用摩尔-库伦本构,地下综合体混凝土结构假定为弹塑性材料,采用混凝土塑性损伤模型,并适量配筋,泥浆层看作弹性模量较小的土体,采用线弹性模型。

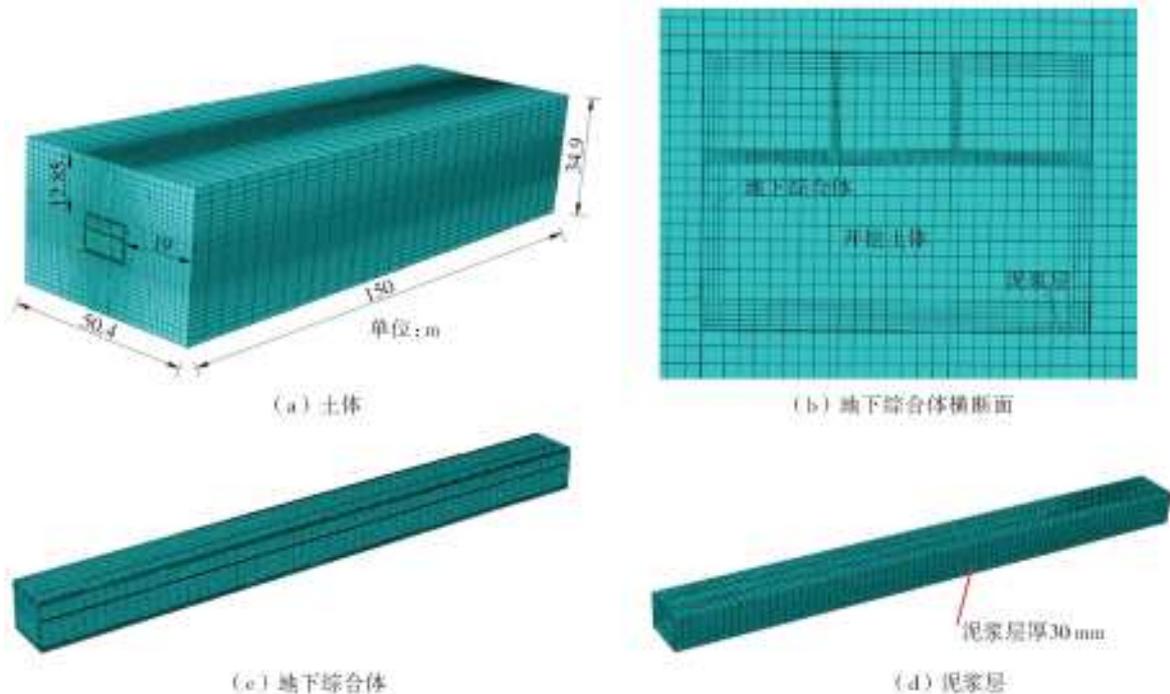


图 2 计算模型

Fig. 2 Calculation model

2.2 材料参数及各运行期计算荷载

参考海口市海甸岛实测地质资料,工程地质土

层划分为 4 层,结构材料选用 C60 钢筋混凝土,钢筋采用 HRB400,各土层及结构计算力学参数见表

1;各运行期下计算荷载见表 2,其中根据《公路桥涵设计通用规范》路面荷载设计为 10.5 kN/m^2 ^[20],为简化计算,取 10.5 kPa 的均布压力作用于交通层底板顶面模拟车荷载作用。本文地下综合体顶板埋深 12.85 m ,故可不考虑地面荷载作用^[21]。

表 1 数值计算力学参数

Tab. 1 Numerical calculation of mechanical parameters

岩土分层	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E/MPa	μ	c/kPa	$\varphi/^\circ$
(1)	1.78	22.85	0.300	19.00	18.00
(2)	1.69	16.10	0.300	19.92	8.98
(3)	1.93	19.61	0.300	20.60	13.90
(4)	1.86	24.50	0.300	24.70	13.10
泥浆层	2.04	10.00	0.480		
混凝土	2.50	36 000.00	0.167		
HRB400	7 850.00	2×10^5	0.300		

表 2 计算荷载

Tab. 2 Calculated loads

工况	底层水深/ m	荷载				
		自重	水重	车荷载	静水压力	土压力
一般运行	0	✓		✓		✓
特殊运行	4.5	✓	✓		✓	✓

2.3 地下综合体的静力特性分析

地下综合体在土压力、结构自重、车荷载、水压力等荷载作用下结构会产生一定的位移,地下综合

体在一般运行期和特殊运行期下的竖向位移分布见图 3。由图 3 可以得出如下结论:地下综合体一般运行期整体沉降水平较低,最大位移值为 48.27 mm ,而特殊运行期的最大位移为 50.91 mm ,略大于一般运行期,最大位移出现部位均是交通层底板。一般运行期、特殊运行期的最小位移分别是 2.65 mm 、 2.67 mm 。从图 3 位移分布云图可直观看出:管廊层顶板、隔板以及管廊层与交通层隔板均出现相对较大的竖向位移。分析结构位移分布得其原因是土体开挖之后,竖向卸荷,其表现为底部隆起、顶部沉降。底部隆起对交通层底板有竖直向上的作用力,使其产生竖直向上的位移,管廊层顶板、隔板以及管廊层与交通层的隔板的沉降是顶部土体沉降所致。

为了较直观地观察地下综合体顶板、隔板和底板的竖向位移值,本文选取 $X=-75$ 的横断面上,各板竖向中点所在路径为 $Y=0$ 到 $Y=11$ 的测点,测点的竖向位移值见图 4。由图 4 可得,地下综合体顶板、隔板、底板的竖向位移分布均为:两端小,中间大,且中间出现最大值。顶板与隔板的竖向位移曲线较为相近,隔板的最大沉降值较顶板略小,这是由于土体开挖之后,竖向卸荷,顶部下沉,作用在顶板的土压力,使其产生竖直向下的位移,而隔板与顶板通过管廊层隔板连接,故顶板的沉降引起隔板的沉降。而底板的位移是土体开挖后底部土体隆起所致。

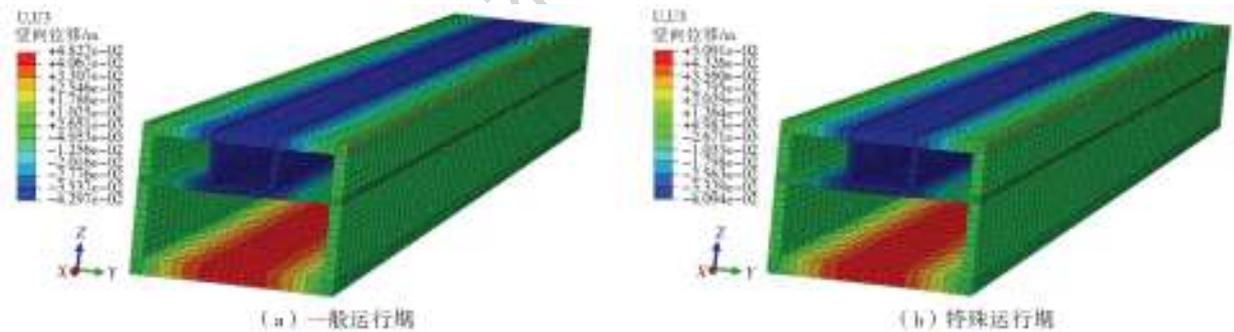


图 3 各运行期地下综合体竖向位移分布

Fig. 3 Vertical displacement cloud map of underground complex in each operating period

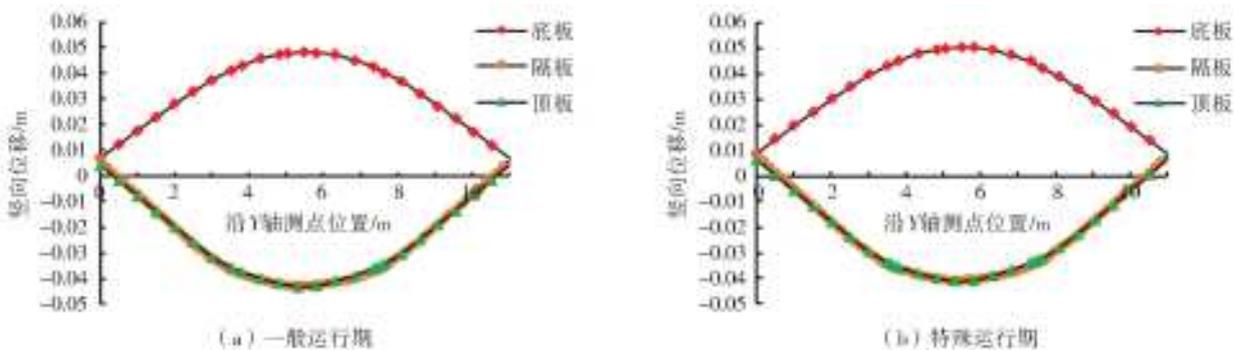


图 4 各运行期测点竖向位移

Fig. 4 Vertical displacement cloud map of measuring points in each operating period

图5为地下综合体在不同运行期下的压应力分布图。从压应力分布图可得,地下综合体整体受压均匀,一般运行期和特殊运行期的最大压应力分别为23.06、23.35 MPa。而C60混凝土的抗压强度

设计值 $[\sigma]=27.5\text{ MPa}^{[22]}$,满足规范设计抗压强度要求。压应力最大的部位为地下综合体底板外侧中部,范围较小,这是由于土体开挖之后,底部隆起,对底板外侧有顶推作用,跨中出现最大值。

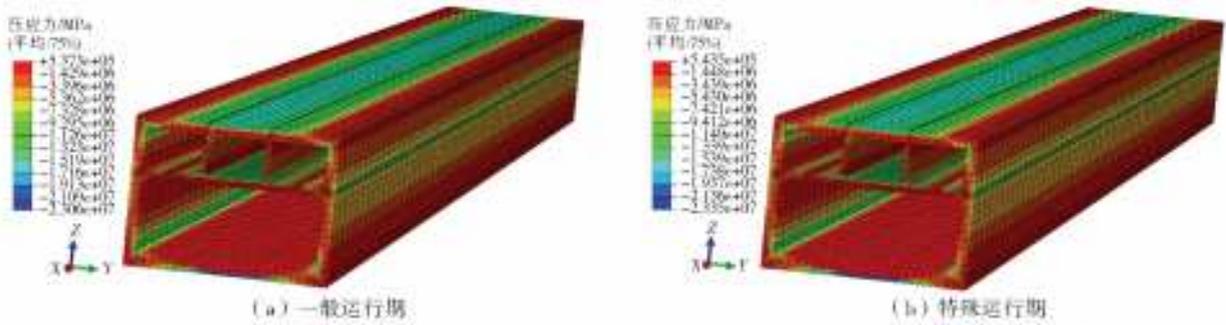


图5 各运行期地下综合体压应力云图

Fig. 5 Pressure stress cloud map of underground complex in each operating period

图6为地下综合体在两种运行期下的拉应力云图。从拉应力分布图可得,地下综合体在两种运行期下的拉应力分布相近,且最大值也相近,一般运行期最大拉应力为2.568 MPa,仅比特殊运行期大0.001 MPa,均略大于C60混凝土的抗拉强度设计值 $[\sigma]=2.04\text{ MPa}^{[22]}$,但是超过抗拉强度的拉应力范围很小,

主要出现在地下综合体隔板与侧墙连接处的侧墙外侧,其原因是土体开挖之后,水平向卸荷时洞室两侧土体向结构收缩,对地下综合体侧墙有主动土压力作用,在隔板与侧墙连接处,隔板对侧墙有顶撑作用,使得侧墙外侧拉应力值较大,对于局部拉应力集中部位,需适当加强配筋以满足抗拉强度要求。

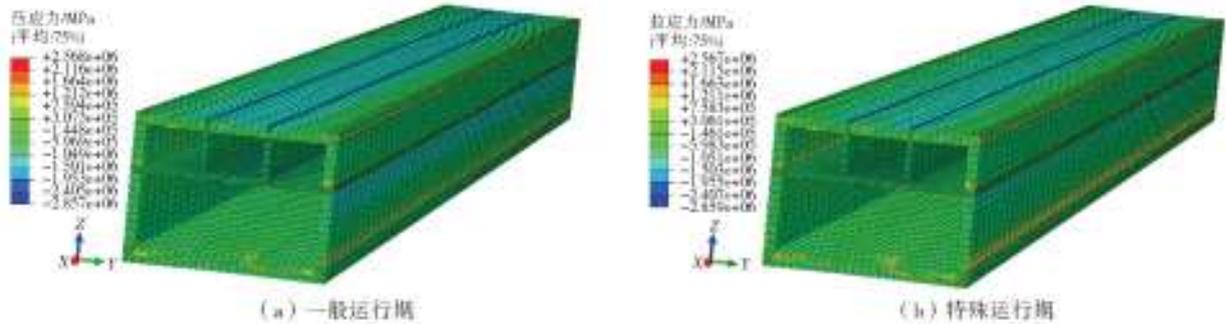


图6 各运行期地下综合体拉应力云图

Fig. 6 Tensile stress cloud map of underground complex in each operating period

3 地下综合体应用及其除涝效果分析

为了进一步验证地下综合体的除涝效果,本文选取海口市海甸岛为研究区域,进行地下综合体的除涝效果分析。沿海城市的内涝积水原因除当地暴雨外,还有一个重要的因素是风暴潮引起的潮水顶托及海水倒灌。暴雨与潮位的共同作用加大了沿海城市内涝模拟的复杂性。从新型多功能城市除涝结构不安全和防洪不利的角度考虑,本文内涝模拟情景选取降雨与潮位共同作用,选用MIKE21二维水动力模型,基于地形文件、潮位文件、降雨文件、糙率文件等,建立求解模型。

3.1 内涝模型基础数据

(1)地形文件。本文计算地形地貌文件来源于张立洪《基于潮、雨遭遇情景的城市防潮排涝数值模

拟及动态评估》^[23]。

(2)降雨文件。从防洪不利的角度考虑,从1970—2012年实测暴雨序列中,取1996年9月19日17:00至9月20日17:00的24h暴雨过程为24h典型暴雨过程(雨型),依据典型暴雨过程,以设计暴雨量值为控制,采取同频率放大法推求雨型时程分配,得到各频率设计暴雨过程^[24]。本文计算选用10年一遇24h降雨过程。

(3)潮位文件。为了考虑潮位对排涝的影响,以多年平均高潮位2.00m为设计潮位峰值,以2000年10月15日11时30分至16日9时50分的潮位过程为典型过程,进行同倍比放缩、插值和延长提取24h潮位过程^[24]。本文选取海口市多年一遇设计潮位过程,在沿海边界、河口及河道两岸边界施加该潮位过程线。

(4)糙率文件。由于受资料详细程度所限,本文研究区域下垫面划分为:屋面、道路路面,公园或绿地,水域(水体),非铺砌地面。不同下垫面的糙率取值分别为:0.045,0.04,0.023,0.035。研究区域分为 13 个排水分区,见图 7,计算各排水分区的综合糙率(式(1)),分区设置糙率。

$$n_i = \frac{S_{ia}}{S_{iz}} \times 0.045 + \frac{S_{ib}}{S_{iz}} \times 0.04 + \frac{S_{ic}}{S_{iz}} \times 0.023 + \frac{S_{id}}{S_{iz}} \times 0.035 \quad (1)$$

式中: S_{ia} 、 S_{ib} 、 S_{ic} 、 S_{id} 分别为各分区屋面、道路路面面积,公园或绿地面积,水域(水体)面积,非铺砌地面面积; S_{iz} 为各分区总面积; n_i 为各分区糙率值; $i=1,2,3,\dots,13$ 。

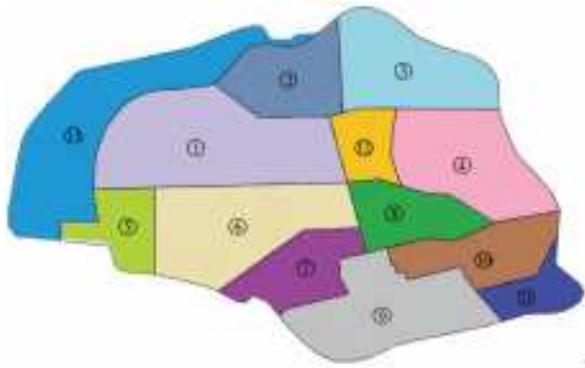


图 7 研究区域排水分区

Fig. 7 Map of drainage area in the study area

3.2 模型的验证

根据海口市三防办提供的海甸岛研究区域实际积水点及其积水深,在一般潮位下对 2010 年 3 日至 8 日降雨形成内涝过程进行模拟,比较模拟结果与实测内涝点数据,以验证所建模型的合理性与可靠性。模型验证内涝图见图 8,验证内涝点积水深度值见表 3。

根据实测内涝点与模拟结果比较可得,模拟内涝点与实测内涝点积水深度、位置分布基本一致,且其误差均在合理的范围内,说明该模型基本可以精准模拟研究区域的潮、雨致涝情景。



图 8 模型验证内涝图

Fig. 8 Model verification of waterlogging

表 3 验证内涝点积水深度值

Tab. 3 Verification of the water depth value at the waterlogging points

内涝点	统计值/m	模拟值/m	误差/%
1	0.5	0.47	6
2	0.5	0.46	8
3	0.5	0.44	12
4	0.5	0.55	10
5	0.4	0.45	10
6	0.5	0.56	12

3.3 计算结果的对比分析

以往降雨内涝研究中,内涝风险评估参数主要有积水深度和积水历时,但积水历时不易定量研究^[25],很少采用,一般用积水深度作为内涝强度的评估参数。此外,积水面积和积水量也可反映内涝强度。本文选用积水深度、积水面积、积水量作为评估内涝强度的参数,也作为评价新型除涝结构措施有效性的指标。

本文设定情景为:10 年一遇降雨与多年一遇潮位共同作用。此情景下现状与修建地下综合体后,研究区域内涝积水如图 9。根据《室外排水设计规范》中规定:居民住宅和工商业建筑物底层不进水,道路中一条车道的积水深度不超过 15 cm^[26]。故本文统计范围为积水深不小于 15 cm 的内涝点。由图 9(a)可得,研究区域现状严重内涝点主要有:海甸五东路、人民大道、海甸二西路、海甸三西路和海达路等。就海甸岛的内涝现状,拟铺设本文提出的兼有缓解交通、优化管廊的新型除涝结构措施地下综合体。而目前海甸岛交通拥堵路段主要有海甸三西路、人民大道、海甸二西路等。拟定沿海甸岛海甸五西路、海甸五中路、海甸五东路铺设地下综合体,铺设路线见图 10,总长 4.8 km。在铺设路线两端及海甸五西路、海甸五中路、人民大道三条主干线的交叉处,设置进出口 1、2、3,见图 10。图 9(b)中可直观的看出,修建地下综合体后,区域积水面积、内涝点积水深均骤减,海甸岛除个别区域仍有小范围的积水外,绝大部分现状内涝点不再有积水。

图 11 为各排水分区积水深不小于 15 cm 的积水点的积水面积(S)与积水量(V),且扣除初始河道、湖泊等处存在的水。由图 11 可得,各片区的积水面积和积水量均减小。其中 9 片区的改善效果最明显,其面积改善率和体积改善率分别为 99.73%、99.76%(其中,各片区积水面积改善率和积水量改善率计算见式(2)、(3)),3、7、11、13 片区改善效果也较为显著,改善率均大于 96%。6、8、10 片区积水面积、积水量减少的幅度相对较小,分析其原因在

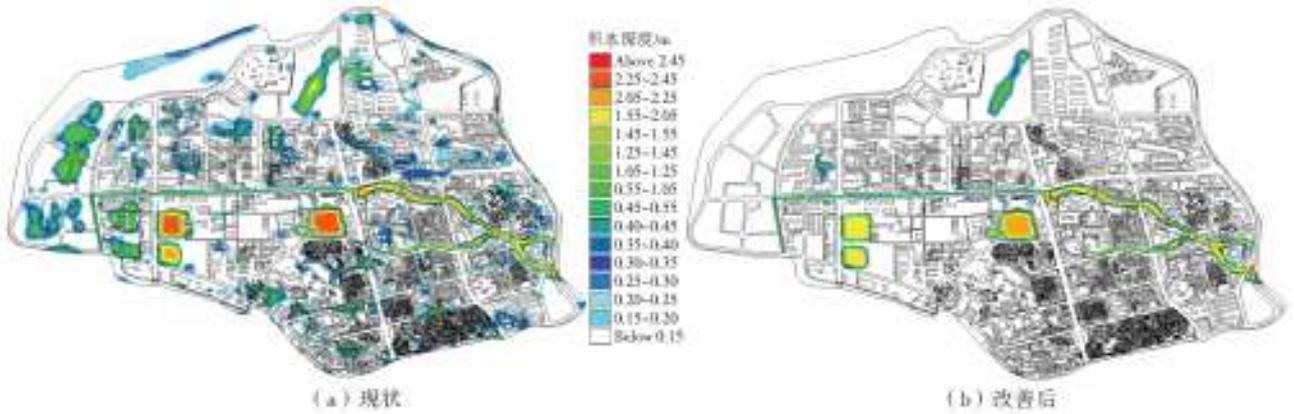


图9 设定情景下现状与修建地下综合体后内涝图

Fig. 9 Waterlogging map at status quo and after the construction of the underground complex



图10 地下综合体铺设路线

Fig. 10 Laying route of the underground complex

于以上三片区初始存在的水域(水体)面积占片区面积比例较大,虽未将水域(水体)初始积水面积、积水

量统计在内,但降雨后部分雨水不入管网,直接汇入其中,河道、湖泊区域积水面积、积水深均增大,故修建地下综合体后片区内涝改善效果不太明显,但河道、湖泊本就有一定的含蓄水能力,故不会因此造成研究区域内涝积水。综上可说明,本文所研发的新型除涝结构措施,可提高城市对雨水的容纳、蓄滞能力,能够大幅降低城市内涝风险。

$$P_i = \frac{S_{i1} - S_{i2}}{S_{i1}} \times 100\% \quad (2)$$

$$P_i = \frac{V_{i1} - V_{i2}}{V_{i1}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_i 、 R_i 分别为积水面积改善率、积水量改善率; S_{i1} 、 S_{i2} 分别为改善前、改善后积水面积; V_{i1} 、 V_{i2} 分别为改善前、改善后积水量; $i=1,2,3,\dots,13$ 。

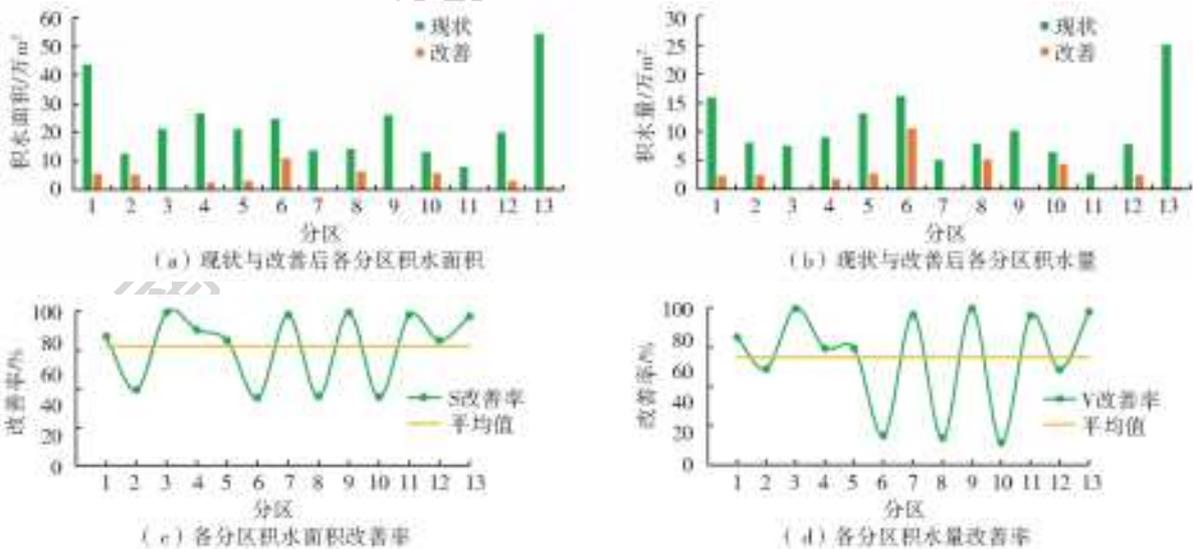


图11 改善前后各分区内涝情况

Fig. 11 Improve the waterlogging condition of each division before and after

4 结论

本文提出新型多功能城市除涝结构地下综合体,基于 ABAQUS 有限元软件,分析结构静力特

性;以案例运用为依托,采用水动力模型,分析其除涝效果。得出以下结论。

(1)运用 ABAQUS 对地下综合体进行结构静力分析,可得:两种运行期下结构的竖向位移均较

小;受力分布较为均匀,最大压应力为 23.35 MPa,小于 C60 混凝土的抗压强度设计值 $[\sigma]=27.5$ MPa;最大拉应力为 2.568 MPa,略大于 C60 混凝土的抗拉强度设计值 $[\sigma]=2.04$ MPa,但超过抗拉强度的拉应力范围极小,只需适当加强配筋即可。

(2)基于 MIKE21FM 模拟研究区域 10 a 一遇降雨多年一遇潮位共同作用下的内涝情景,对现状和铺设地下综合体后内涝积水面积、积水量及其改善率对比分析,可得本文提出的新型多功能除涝结构措施,可提高研究区域的雨水蓄滞、容纳能力。

(3)与以往缓解城市内涝措施相比,本文提出的新型多功能除涝结构措施,可有效缓解城市内涝现状;亦可缓解城市交通压力;且留有管廊层,方便市政管线入廊,亦可有效避免因敷设、检修地下管线造成的道路重复开挖,结构在城市除涝、城市交通、综合管廊各方面都具有实用性和高效性。

本文开发的地下综合体还未投入实际工程,各运行工况都较理想化,且未考虑修建地下综合体对地上建筑物的影响,未来拟将更多实际工程问题考虑到数值模拟中。

参考文献(References):

[1] 李茂松,李森,李育慧. 中国近 50 年洪涝灾害灾情分析[J]. 中国农业气象,2004(1):40-43. (LI M S, LI S, LI Y H. Analysis of flood disaster in China in the past 50 years[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2004 (1):40-43. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1000-6362.2004.01.011.

[2] 张辉,许新宜,张磊,等. 2000—2010 年我国洪涝灾害损失综合评估及其成因分析[J]. 水利经济,2011,29(5):5-9,71. (ZHANG H, XU X Y, ZHANG L, et al. Comprehensive assessment and analysis of flood and waterlogging losses in China from 2000 to 2010[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011, 29 (5):5-9,71. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1003-9511.2011.05.002.

[3] 叶斌,盛代林,门小瑜. 城市内涝的成因及其对策[J]. 水利经济,2010,28(4):62-65,78. (YE B, SHENG D L, MEN X Y. Causes and countermeasures of urban waterlogging[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2010, 28(4):62-65,78. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1003-9511.2010.04.016.

[4] 王峰,颜正惠,黄伟乐,等. 城市雨水内涝成因及对策[J]. 中国给水排水,2012,28(12):15-17,20. (WANG F, YAN Z H, HUANG W L, et al. Causes and solutions of urban rainstorm waterlogging[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(12):15-17,20. (in Chinese))

DOI:10.3969/j.issn.1000-4602.2012.12.004.

[5] 冯杰,黄国如,张灵敏,等. 海口市城市暴雨内涝成因及防治措施[J]. 人民珠江,2015,36(5):71-74. (FENG J, HUANG G R, ZHANG L M, et al. Causes analysis and prevention measures of urban waterlogging in Haikou City[J]. Pearl River, 2015, 36(5):71-74. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.2015.05.018.

[6] 李婕. 浅谈我国城市内涝灾害现状和对策[J]. 中华民居,2012(6):224. (LI J. On the present situation and countermeasures of urban waterlogging disasters in China[J]. China? Homes, 2012(6):224. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1674-3954.2012.06.190.

[7] 卢炯平,李振强,彭佳涓. 我国特大城市内涝治理措施探讨[J]. 给水排水,2015,51(S1):93-97. (LU J P, LI Z Q, PENG J M. The discussion on measures to control waterlogging in megacities in China [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 51(S1):93-97. (in Chinese)) DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2015.0351.

[8] LEITÃO J P, CARBAJAL J P, RIECKERMANN J, et al. Identifying the best locations to install flow control devices in sewer networks to enable in-sewer storage [J]. Journal of Hydrology, 2018, 556. DOI:10.1016/j.jhydrol.2017.11.020.

[9] WALLIS S. Bangkok examines flood prevention plans. TunnelTalk. 2011-12. DOI: <http://www.tunneltalk.com/Bang-kok-Thailand-Dec1-Floods-bring-forward-major-mitigation-plans.php>.

[10] RHOCKABY. Malaysia's Smart Tunnel. Studymode. 2012-03. DOI: <http://www.studymode.com/essays/Malaysia's-Smart-Tunnel-948954.html>.

[11] 米军,罗玉林. 城市综合管廊中可“入廊”管线种类分析[J]. 四川水泥,2016(12):314,267. (MI J, LUO Y L. Analysis of the types of pipeline that can be entered in the urban comprehensive pipe gallery[J]. Sichuan Cement, 2016 (12): 314, 267. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1007-6344.2016.12.299.

[12] 王贝贝,戴素娟. 浅谈我国城市地下综合管廊建设的必要性以及发展前景[J]. 安徽建筑,2015,22(6):43,159. (WANG B B, DAI S J. On the necessity and prospect of the construction of underground comprehensive pipe gallery in Chinese cities[J]. Anhui Architecture, 2015, 22 (6): 43, 159. (in Chinese)) DOI:10.16330/j.cnki.1007-7359.2015.06.019.

[13] 施卫红. 城市地下综合管廊发展及应用探讨[J]. 中外建筑,2015(12):103-106. (SHI W H. Discussion on the development and application of urban underground comprehensive pipe gallery [J]. Chinese & Overseas Architecture, 2015 (12): 103-106. (in Chinese))

- [14] 段旺,杨佩英. 地下机动车联通解决城市核心区交通问题尝试[C]// 国际地下空间学术大会会议, 2006. (DUAN W. An attempt to solve the traffic problem in urban core area by underground vehicle connection [C]// International conference on underground space, 2006. (in Chinese))
- [15] 杨琨. 浅谈城市综合管廊的设计[J]. 城市道桥与防洪, 2013(5): 236-239, 3. (YANG K. On the design of urban comprehensive pipe gallery [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(5): 236-239, 3. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-7716. 2013. 05. 078.
- [16] 刘汉涛. 长春市临河街地下综合管廊设计与施工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017. (LIU H T. Study on design and construction technology of underground comprehensive pipe gallery in linhe street of Chang Chun City [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese))
- [17] 李素艳, 杨东援, 杨扬, 等. 城市地下道路横断面设计研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007(1): 114-117, 123. (LI S Y, YANG D Y, YANG Y, et al. Research on design of urban tunnel cross section [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007(1): 114-117, 123. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-0836. 2007. 01. 025.
- [18] YIN J, YU D P, YIN Z E, et al. Evaluating the impact and risk of pluvial flash flood on intra-urban road network: A case study in the city center of Shanghai, China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 537. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 03. 037.
- [19] 费康, 张建伟. ABAQUS在隧道及地下工程中的应用(水利水电版) [J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 552. (FEI K, ZHANG J W. Application of ABAQUS in tunnel and underground engineering (Hydro-electric edition) [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 552. (in Chinese))
- [20] JTG D60-2004. 公路桥涵设计通用规范. [S]. (JTG D60-2004. General specifications for design of highway bridges and culverts. [S]. (in Chinese))
- [21] 张佩, 路德春, 杜修力, 等. 深埋隧道与浅埋隧道划分方法研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(s2): 422-427. (ZHANG P, LU D C, DU X L, et al. Division method for deep and shallow tunnels [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(s2): 422-427. (in Chinese))
- [22] GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. (GB 50010-2010. Code for design of concrete structures [S]. (in Chinese))
- [23] 张立洪. 基于潮、雨遭遇情景的城市防潮排涝数值模拟及风险评估研究[D]. 天津: 天津大学, 2017. (ZHANG L H, The city suffered tide, rain scene prevention and drainage and countermeasure research based on dynamic simulation [D]. Tianjing: Tianjin University, 2017. (in Chinese))
- [24] 海口市水务局. 海口市防洪(潮)规划报告[R]. 海口: 海口市水务局, 2008. (Haikou Water Affairs Bureau. Haikou Flood Control (Tide) Planning Report [R]. Haikou: Haikou Water Affairs Bureau, 2008. (in Chinese))
- [25] 孙阿丽, 石纯, 石勇. 基于情景模拟的暴雨内涝危险性评价: 以黄浦区为例[J]. 地理学, 2010, 30(3): 465-468. (SUN A L, SHI C, SHI Y. The risk assessment of rainstorm waterlogging based on scenario simulation takes huangpu district as an example [J]. Geography, 2010, 30(3): 465-468. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2010. 03. 003.
- [26] GB 50014—2006. 室外排水设计规范[S]. (GB 50014—2006. Code for design of outdoor wastewater engineering [S]. (in Chinese))