

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.01.020

卢塞尔体育场屋面雨水排水模拟分析

康晓鹄, 杨彩青, 陈玖玖, 邓旭阳, 郭歆雪, 郑克白
(北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045)

摘要: 卢塞尔体育场作为2022年世界杯开幕式和闭幕式的举办地,是卡塔尔世界杯比赛期间最重要的球场之一。在对体育场建设位置地理、气候条件和屋面构造特征等因素分析的基础上,通过采用FLUENT软件对卢塞尔体育场屋面排水进行模拟分析。结果表明,当发生百年一遇降雨事件时,屋面内天沟最深处水深约为0.12 m,外天沟最不利水深约为0.15 m,均满足设计要求;末端沉箱内水深最深约为1.6 m,小于现状沉箱设计深度,可以满足屋面排水需求。对于超大型建筑屋面雨水排水,通过模拟验证了设计的可行性,也为大型屋面雨水排水设计提供了新思路。

关键词: 卢塞尔体育场; 屋面雨水; 模拟; 天沟

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)01-0134-05

Simulation of Rainwater Drainage from the Roof of Lusail Stadium

KANG Xiao-kun, YANG Cai-qing, CHEN Jiu-jiu, DENG Xu-yang, GUO Xin-xue, ZHENG Ke-bai

(Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China)

Abstract: The Lussel Stadium, which has hosted the opening and closing ceremonies of the 2022 World Cup, is one of the most important stadiums during the tournament in Qatar. Based on the analysis of factors such as geography, climate and roof structure characteristics, the FLUENT software was used to simulate the roof drainage of Lussel Stadium. When there was a hundred-year rainfall event, the deepest water depth of the inner gutter on the roof was approximately 0.12 m, and the most unfavorable water depth of the outer gutter was approximately 0.15 m, suggesting that the water depth of the gutter met the design requirements. The deepest water depth in the bottom collection box was approximately 1.6 m, which was less than the current design depth of the collection box and met the demand of roof drainage. For rainwater drainage of super large building roof, the feasibility of the design was verified by the simulation, which also provided a new idea for the rainwater drainage design of large roof in the future.

Key words: Lusail Stadium; roof rainwater; simulation; gutter

卡塔尔地处亚洲西部,位于波斯湾西南岸的卡塔尔半岛,与阿联酋和沙特阿拉伯接壤,海岸线全长550 km。卡塔尔属于热带沙漠气候,炎热干燥,沿岸潮湿。4月—10月为夏季,最高气温可达45℃;冬季凉爽干燥,历史最低气温为7℃。

1 项目介绍

卢塞尔城位于卡塔尔首都多哈东北向约15

km,是因卡塔尔世界杯而全新兴建的面积约20 km²的城市。卡塔尔常年降雨量不足80 mm,但近些年极端强对流天气频现,如2015年11月和2018年10月,卡塔尔均遭遇了罕见降雨,日降雨量均大于多年平均降雨量,造成城市积水内涝,多座体育馆和航站楼发生溢水事故。

卢塞尔体育场作为2022年世界杯开幕式和闭

幕式的举办地,是卡塔尔世界杯比赛期间最重要的球场之一。为确保场馆屋面雨水排水设施和屋面结构的安全性,同时实现精细化设计,拟对卢塞尔体育场屋面排水进行模拟分析,校核在最不利情况下屋面排水情况以及积水对屋面覆膜和结构桁架安全的影响。

2 屋面形式及排水设施

2.1 屋面构造

卢塞尔体育场能同时容纳观众约 9.2 万人,屋面总面积约为 $6.72 \times 10^4 \text{ m}^2$,屋面整体呈双曲抛物面形式,东西高、南北低,最大高差达 25.2 m。体育场屋面由内到外可分为挑棚屋面、覆膜屋面和外圈压环屋面三部分。其中挑棚屋面的面积约为 3 166 m^2 ;覆膜屋面采用聚四氟乙烯(PTFE)膜,该材质具有较好的抗紫外线和阻燃性能,同时兼有良好的焊接性能和力学性能,已越来越多地应用到大型公共建筑屋面材料中,覆膜屋面总面积约为 47 464 m^2 ;屋面外圈压环及内外天沟采用金属材质,面积约为 16 600 m^2 ,体育场屋面平面组成如图 1 所示。

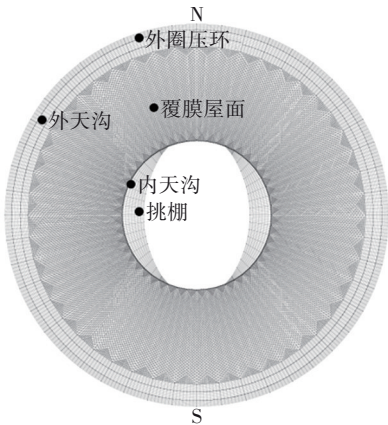


图1 屋面组成示意

Fig.1 Schematic diagram of roof composition

2.2 排水天沟

卢塞尔体育场屋面排水天沟分为内天沟和外天沟,内天沟位于挑棚和覆膜屋面之间,主要承接整个挑棚和部分覆膜屋面的雨水,平时可以作为屋面检修巡查通道。内天沟断面为矩形,沟宽为 500 mm,高为 1 000 mm。外天沟位于外圈压环屋面内,主要用于接收覆膜屋面、内天沟转输的挑棚屋面和外圈压环屋面的排除雨水,平时可以作为检修通道和屋面清洗设备的运行通道。外天沟断面为矩形,宽为 5 000 mm,高为 840 mm。天沟断面尺寸见图 2。

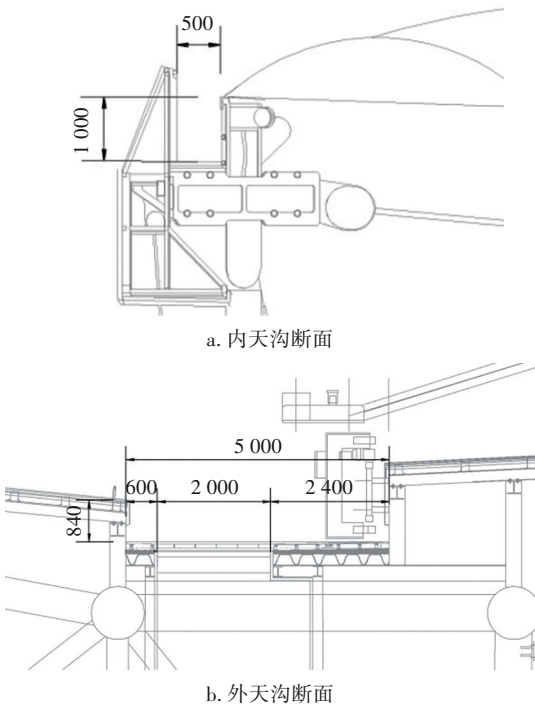


图2 天沟断面尺寸

Fig.2 Cross section size of gutter

2.3 沉箱

根据当地气候条件和屋面构造特点,同时为保证世界杯体育赛事期间良好的观赛体验,经与建筑和结构专业人员沟通,本项目未在屋面范围内设置雨水悬吊管,利用屋面结构及竖向特点,采用重力流方式排水。在屋面南北两端外天沟的最低处各设有两个下沉式集水箱(简称“沉箱”),沉箱底部由两根 900 mm 平衡管连接以确保沉箱排水管排水均衡,尺寸如图 3 所示。

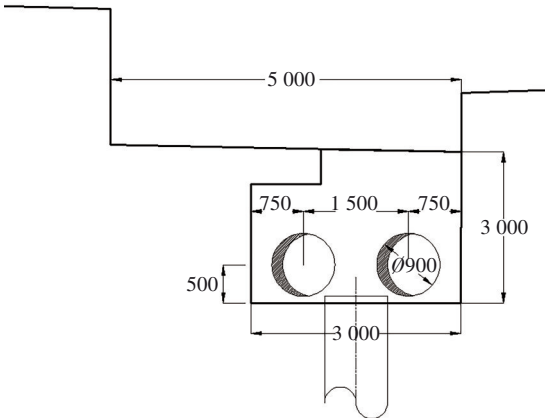


图3 沉箱及平衡管尺寸

Fig.3 Cross section of collection boxes and equalizing pipes

2.4 雨水立管

受沉箱底部屋面结构桁架位置的影响,在沉箱内设置三根雨水排水立管,单根管径为DN500,立管布置如图4所示。

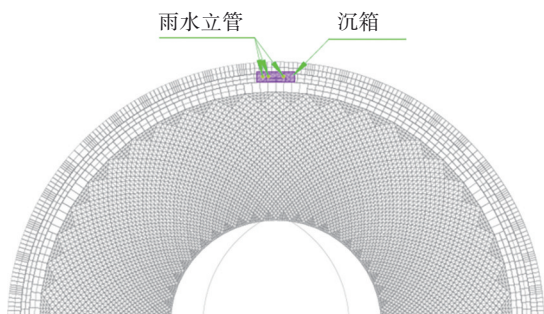


图4 雨水立管平面位置

Fig.4 Plane location diagram of stormwater riser

3 屋面竖向排水分析

3.1 膜单元汇流

为减少雨水斗和雨水悬吊管数量,常规大型屋面项目大多采用虹吸压力排水。但由于屋面面积较大,仍会有一定数量的雨水悬吊管。以本项目为例,若采用虹吸雨水斗(雨水斗按100 mm计),则设置约200个虹吸雨水斗以满足屋面雨水排水需求,这不但增加了建设成本,也为施工安装和日常检修带来不便。同时,由于传统虹吸雨水排水多将虹吸雨水斗设置在集水箱中,根据虹吸排水要求,会设置一定高度的垂直管段,占用屋面下的安装空间,不利于实现良好的观赛体验。经过对屋面构造和竖向特点的反复论证,最终确定采用PTFE覆膜屋面。由于会形成大小不一的覆膜单元,各单元之间会形成倒三角形排水沟槽,如图5所示。覆膜屋面雨水会优先排至覆膜间微型排水沟槽,沿屋面竖向向南北(屋面最低点)双向排放。

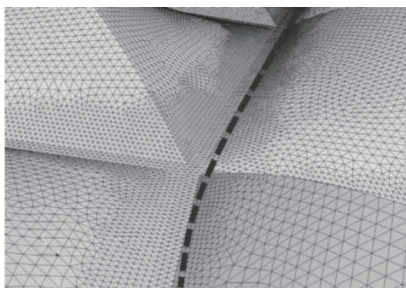


图5 覆膜单元间的小排水沟

Fig.5 Drainage ditches between film-covered units

3.2 屋面汇流

根据屋面构造和标高可知,屋面雨水总体呈向

内天沟和外侧沉箱汇流的趋势。全部挑棚雨水和一部分覆膜屋面雨水先汇入内天沟,在内天沟内部分别向南北两端汇集至外侧沉箱。大部分覆膜屋面雨水随屋面竖向沿覆膜排水沟汇流至外天沟,后沿外天沟排至末端雨水沉箱,如图6所示。

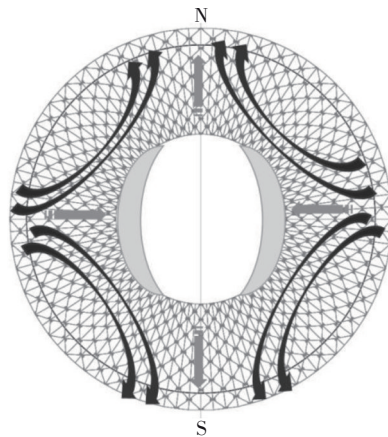


图6 排水方向示意

Fig.6 Schematic diagram of drainage path on the roof

4 模拟分析

4.1 设计标准及降雨参数

按重现期为100 a进行屋面雨水排水模拟分析,采用卡塔尔排水设计手册(Qatar Sewerage and Drainage Design Manual)中推荐的暴雨强度公式:

$$I = \frac{CT_r^m}{(t+d)^n} \quad (1)$$

式中: I 为暴雨强度,mm/h; T_r 为重现期,a; t 为降雨历时,屋面一般按5 min计; C 、 m 、 n 、 d 均为修正参数,分别为410、0.206、0.787、10。

4.2 模拟软件及数值模型的选择

罗岚兮等^[1]采用CFD对多型号虹吸排水雨水斗的启动情况进行模拟分析;李学良等^[2]采用CFD对屋面雨水排水横干管末端检查井和消能池气水两相流的工况进行计算机数值模拟,得出了消能优化方案。目前数值模拟主要集中在雨水斗、排出管等局部范围,对全屋面排水模拟分析案例较少。

根据以往工程经验和卢塞尔体育场的构造特点,经过综合对比,本研究采用FLUENT软件进行模拟分析,采用自带的ICEM程序进行网格划分。模拟过程包括降雨、屋面流动和沉箱模拟三部分,分别采用不同的模型。其中降雨采用DPM模型(离散相模型);湍流模型选用 k -epsilon(k - ϵ)模型,同时根据前期工程验证和模拟计算,通过半经验公式

推导出的标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型具有较高的稳定性和计算精度,满足工程设计要求,因此本次模拟分析选择标准 $k-\varepsilon$ 模型,常数项采用系统默认值。膜面和沟槽面采用欧拉壁膜(EWF)模型;在屋面雨水排水系统各设施工作条件下,沉箱内为气液两相状态,沉箱采用多相流(VOF)模型。

4.3 模拟模型的建立

4.3.1 屋面简化说明

卢塞尔体育场的屋面面积较大,较难开展足尺模型数值计算,因此按照弗劳德相似准则进行缩放,几何比尺为1:100。屋面雨水依靠重力驱动流动,根据满足一个主要力相似忽略其他次要力相似的模型规律原则,选用弗劳德准则数,即主要相似为重力相似^[3]。模型流体和原型流体必须保持流动相似,并且满足几何相似、运动相似、动力相似、初始条件和边界条件相似等要求。同时由于建筑场馆为对称结构,根据对称原则,采用屋面结构的1/2作为模拟范围。此模拟设置对称面进行对称处理,对称面上水流可以相互流动,不影响全屋面径流模拟结果。

4.3.2 分步模拟说明

外天沟末端雨水集水沉箱相对屋面尺寸极小,前期试算发现,一次建模模拟中,沉箱处特别是雨水立管口处,因网格尺寸差距过大,往往出现计算错误。经过反复调整核算,先模拟膜面以及内外天沟降雨和雨水流动过程,沉箱处设置为压力出口;再进行沉箱模拟分析,采用前期模拟得到的外天沟输入流量、流速、水流高度等参数作为模拟条件,采用两相流模型模拟沉箱内水流的流动。

4.3.3 模拟参数的选定

模型的模拟参数主要有降雨量、降雨速度、屋面摩擦系数等。其中降雨量按重现期为100 a计算,雨滴直径为3 mm,雨速为5 m/s。100 a重现期下的降雨强度为125.7 mm/h,屋面流量为1 056.35 L/s。

4.3.4 网格划分及边界条件

在现有模型基础上增加了垂直壁面,并在其上表面加了一个全局降雨面。降雨面设置为速度入口,两个侧面设置为自由出流,两个剖切面设置为对称面,膜面和天沟表面设置为壁面,沉箱处设置为自由出流。采用ICEM进行网格划分,其中膜面模拟分析时网格约为 980×10^4 个,四面体约为 500×10^4 个,网格划分结果如图7所示。

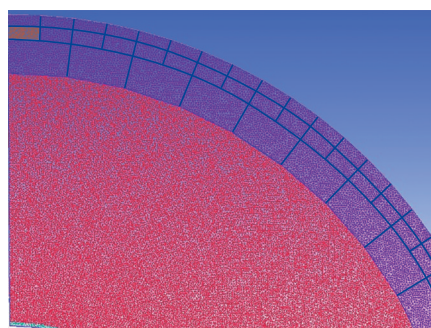


图7 模型及外天沟网格示意

Fig.7 Schematic diagram of model and outer gutter grid

5 模拟结果

5.1 屋面水深模拟

水流深度模拟结果如图8所示。

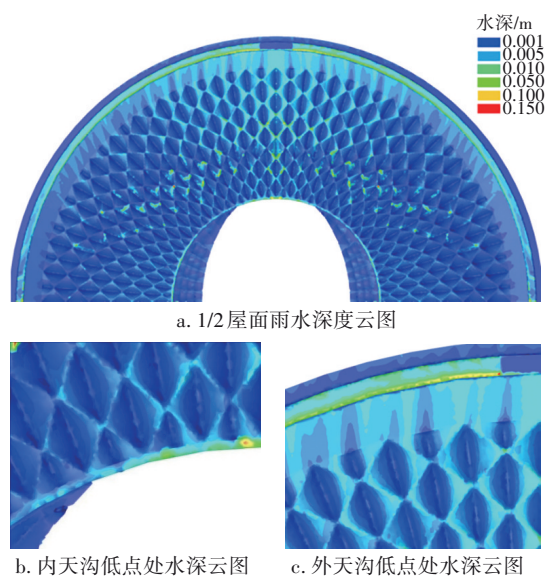


图8 百年一遇屋面雨水深度云图

Fig.8 Cloud picture of water depth for a hundred-year rainfall event

膜面的高点处水深很小(蓝色),膜间沟槽水深较大(绿色或黄绿色),说明膜间沟槽具有良好的汇流作用。膜面接近外天沟处有明显的冲刷现象,冲刷方向指向外天沟。膜间沟槽水深为0.003~0.100 m。内外天沟越靠近沉箱高程越低,相应的水流深度越深,屋面最大水流深度出现在外天沟末端(接近沉箱处),约为0.15 m。稳态后内天沟最不利水深约为0.12 m,外天沟最不利水深约为0.15 m。设计内天沟挡板高度为1.0 m,外天沟沟深为0.84 m,设计条件满足重现期100 a的排水需求。同时,根据屋面雨水径流水深,核算稳态后屋面雨水荷载可知,全屋面上停留水的总荷载为1 945.5 kN(不包含

沉箱内的水),其中膜面停留水总荷载为1 060.8 kN,内外环停留水总荷载为53.6 kN,外环停留水荷载为831.1 kN,各项荷载满足结构设计要求。

5.2 屋面流速模拟

稳态后屋面雨水的排水流速分布情况如图9所示。可知,覆膜间沟槽起到了导流作用,覆膜屋面的雨水流速最大位置均发生在沟槽处。屋面流速最大位置位于外天沟末端,流速约为1.0 m/s。

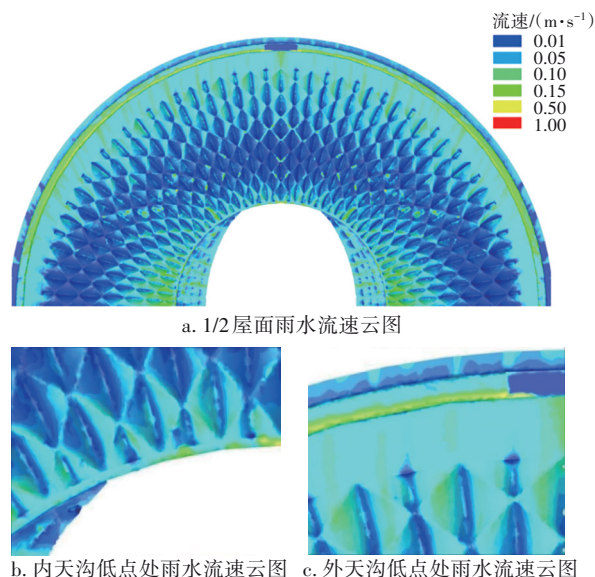


图9 百年一遇屋面雨水流速云图

Fig.9 Cloud picture of flow velocity for a hundred-year rainfall event

5.3 沉箱水深模拟

按重现期为100 a强度降雨模拟,流态稳定后,沉箱内水体积占比(水占气水混合后的比例)如图10所示。可知,最大深度为1.6 m(按45%水气占比计),小于沉箱3.0 m的设计深度,不会发生溢流,沉箱设计深度满足屋面排水需求。

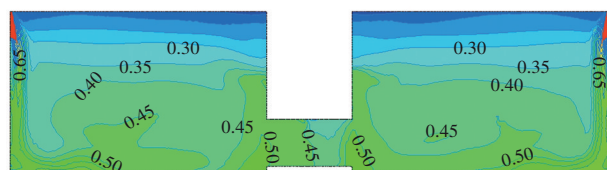


图10 沉箱内水气体积百分比

Fig.10 Volume percentage of the collection box

6 结论

① 当发生百年一遇降雨事件时,卢塞尔体育场屋面内天沟最不利水深约为0.12 m,外天沟最不利水深约为0.15 m,均满足雨水天沟设计要求;根

据屋面承载雨水深度和密度核算最不利屋面荷载约为1 945.5 kN,其中膜面总荷载为1 060.8 kN,内外环停留水总荷载为53.6 kN,外环总荷载为831.1 kN,满足屋面桁架的荷载要求;由于覆膜单元间沟槽的导流作用,覆膜屋面的雨水流速最大点位均发生在沟槽处,全屋流速最大位置位于外天沟末端,流速约为1.0 m/s;100 a重现期降雨情况下,末端沉箱内水深约为1.6 m,小于现状沉箱设计深度,满足屋面排水需求。

② 根据项目的特殊气候条件和工程自身构造特点采用重力流排水,通过模拟验证了设计的可行性,可为超大型屋面雨水排水设计提供思路。

参考文献:

- [1] 罗岚兮,归谈纯,李学良,等.虹吸式屋面雨水排水系统单斗虹吸启动数值模拟研究[J].给水排水,2019,45(1):86-99.
LUO Lanxi, GUI Tanchun, LI Xueliang, et al. Investigation and numerical modelling of the priming of single-outlet siphonic roof drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45 (1) : 86-99 (in Chinese).
- [2] 李学良,归谈纯,熊曦.CFD模拟技术在上海中心大厦屋面雨水系统消能措施上的应用研究[J].给水排水,2019,45(2):84-93.
LI Xueliang, GUI Tanchun, XIONG Xi. Application of CFD simulation technology in energy dissipation measures of roof rainwater system of Shanghai Center Building [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(2):84-93 (in Chinese).
- [3] 周一鸣,张军,薛栓平,等.弗劳德准则于迷宫式水蓄冷模型实验的适应性研究[J].上海节能,2018(1):25-29.
ZHOU Yiming, ZHANG Jun, XUE Shuanping, et al. Adaptability research on Froude criterion for labyrinth type water storage model experiment [J]. Shanghai Energy Conservation, 2018 (1) : 25-29 (in Chinese).

作者简介:康晓鹏(1982-),男,北京人,硕士,高级工程师,研究方向为建筑给排水及海绵城市建设。

E-mail:kangxiaokun@126.com

收稿日期:2022-06-08

修回日期:2022-09-28

(编辑:任莹莹)