

DOI:10.11918/201908114

新型装配式冰场受力性能试验与模拟分析

张文元^{1,2}, 杨奇勇³, 朱勇军⁴, 郑 方⁵

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090; 3. 北京国家游泳中心有限责任公司, 北京 100101; 4. 悉地(北京)国际建筑设计顾问有限公司, 北京 100013; 5. 北京市建筑设计研究院有限公司, 北京 100045)

摘 要: 为在 2022 年冬奥会期间将国家游泳中心泳池场地改造为冰壶场地, 结合临时场地的新型制冰方式, 提出了一种全装配式的冰壶场地及支承结构体系的构造作法. 对此装配式冰场进行了现场试验测试和有限元受力性能分析, 研究了装配式冰场的自振频率和振型特点, 分析了冰场在使用荷载作用下的整体变形和各组件的应力水平, 探讨了极端荷载作用下冰面受力、变形及开裂等关键问题. 研究表明, 所提装配式冰场方案具有较大刚度和承载力, 能够满足冬奥会冰壶比赛对冰面的要求; 此类冰场宜使用轻型浇冰车作业, 大型浇冰车轮压引起的弯矩和剪力作用下冰面存在开裂的可能.

关键词: 支承结构; 装配式冰场; 自振频率; 承载力; 刚度

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)08-0132-08

Experimental research and FEM simulation on the mechanical performance of a new type of assembled ice rink

ZHANG Wenyuan^{1,2}, YANG Qiyong³, ZHU Yongjun⁴, ZHENG Fang⁵

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China; 3. Beijing National Aquatics Center Co. Ltd., Beijing 100101, China; 4. CCDI Group, Beijing 100013, China; 5. Beijing Institute of Architectural Design (Group) Co. Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: To transform the swimming pool of the National Aquatics Center into a curling field for the 2022 Winter Olympics, a construction method of a fully assembled curling field with supporting structure was proposed in consideration of a new ice-making method. Based on the results of field test and finite element analysis conducted on the assembled ice rink, the characteristics of the natural frequencies and corresponding mode shapes of the assembled ice rink were studied. The overall deformation and the stress level of each component of the ice rink under service loads were analyzed, and the stress, deformation, and cracking in ice layer under extreme loads were discussed emphatically. The research shows that the proposed assembled ice rink had greater stiffness and loading capacity, which can meet the requirements of curling games in Winter Olympics. This kind of ice rink should be operated by a light ice resurfacing machine, since ice cracking is likely to be generated under bending and shearing actions of wheel load of large ice resurfacing machines.

Keywords: supporting structure; assembled ice rink; natural frequency; loading capacity; stiffness

国家游泳中心(水立方)将在 2022 年冬奥会中承担冰壶比赛任务, 需要在不破坏既有功能的情况下将原有的游泳场地临时转换为冰壶场地, 并要求在赛后日常经营中随时完成泳池与冰场之间的转换(图 1). 因此, 装配式转换场地支承体系和冰面作法至关重要, 既要具有足够的刚度和承载力, 又不能损坏原有泳池场地.

目前, 转换场地多用于大众娱乐式冰上运动或其它运动项目^[1], 也常用于赛场临时看台或各种文艺活动的临时舞台^[2], 但用场地转换技术形成冰场来承担国际大赛尚无先例. 一般临时看台或舞台对场地的刚度和承载力的要求, 多是基于使用者舒适度和结构安全性确定的^[3-4], 按建筑结构设计规范验算承载力来确保支承结构的安全性, 控制场地竖向自振频率或加速度限值来确保舒适性要求. 例如, 中国混凝土结构设计规范^[5]对于公共、办公和旅馆、住宅和公寓等建筑的楼板, 要求其竖向自振频率分别不宜低于 3、4 和 5 Hz. 美国钢结构学会(AISC)

收稿日期: 2019-08-22

基金项目: 北京市科技计划项目(D171100001117001);

中建股份科技研发计划资助(CSCEC-2019-Z-7)

作者简介: 张文元(1972-), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 张文元, hitzwy@163.com

的钢结构设计指南^[6]规定普通运动项目的楼面基频不小于5.9~9.2 Hz,举重和跳跃性运动项目的楼面基频不小于9.2~10.6 Hz.英国结构工程师学会(IStructE)规定了看台结构竖向振动加速度最大值^[7]:当主要承受静态观众时为3%g,流行音乐会为7.5%g,多数观众跳跃的强感音乐会为20%g,其中g为重力加速度.

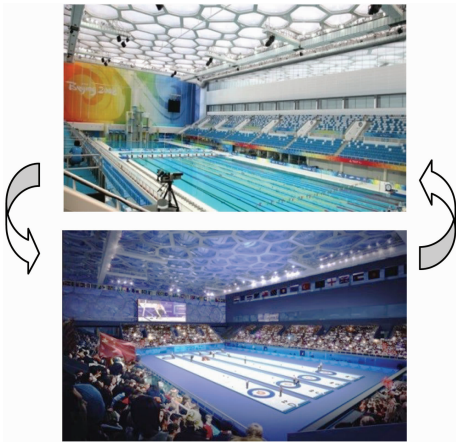


图1 国家游泳中心的场地转换

Fig.1 Functional transformation of the National Aquatics Center field

对于用来承担国际大赛的冰场,显然对场地的刚度和承载力应具有更高的需求,不仅需要保证场地的安全性和舒适度,尚需确保场地的振动和变形不会对比赛的正常使用功能造成影响.例如对于冰壶比赛,冰壶在冰面上运行过程中更容易受到冰面竖向变形和振动的影响^[8],若影响程度超出运动员的掌控范围,将会对比赛效果和成绩产生负面影响;又如在比赛运动员大幅度冲击运动作用下或在冰面维护过程中满载浇冰车反复碾压下,如果冰面出现开裂,将直接影响运动观感或者使场地失效.另外,对于图2所示的永久冰场,通常采用传统习惯做法^[9],包括国际冰壶联合会(WCF)在内的各国际冰上运动组织也没有形成一个明确的力学性能指标要求与制造标准,这使临时转换冰场的研发标准更加无据可依.

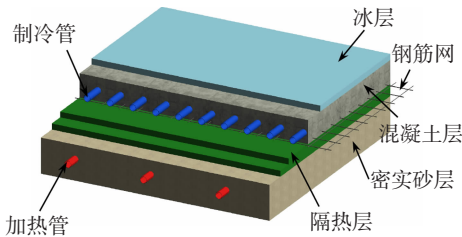


图2 永久冰上场地的典型作法

Fig.2 Typical construction of permanent ice field

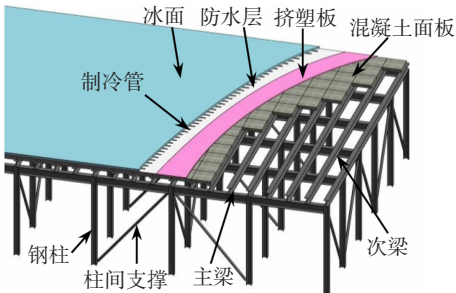
因此,需要对装配式转换冰场的支承结构形式、冰面做法、冰面力学性能指标进行系统研究,进行性能评估,确保冬奥会的圆满举办,并为今后制定冰面

场地建设标准提供依据.

1 装配式冰场作法

1.1 支承结构作法

在水立方泳池池底搭建图3所示的能够自独立的装配式支撑钢框架结构,具有可快速装拆、能够自由调节高度、竖向刚度大、承载力高、抵抗温度变形能力强等优点.框架顶面与池岸平齐,为冰场提供一个具有充足承载力、刚度和使用面积的大平台.支撑钢框架的柱网为2.4 m×1.8 m,层高为3.0 m,约等于泳池深度.钢柱、主梁、次梁和柱间支撑的截面分别为:H150×150×4.5×6、H250×150×4.5×6、H200×150×4.5×6和圆管φ68×4,材质均为Q235B级.



(a) 装配式冰场的构成



(b) 现场整体试验照片

图3 装配式冰场

Fig.3 Assembled ice rink

为便于安装,梁柱之间均采用图4(a)所示的端板螺栓连接.次梁与主梁采用叠接形式,次梁上表面平齐,为面板安装提供统一平面.面板采用600 mm×600 mm×100 mm的C30轻质混凝土块,单重不超过750 kN.面板两对边简支于次梁之上,板下部配钢筋网,面板四角如图4(b)所示预埋长螺母,与次梁上翼缘通过螺栓固定.图4(c)给出了柱脚调节装置示意,通过球铰支座,可以调节柱子的垂直度;通过旋转六棱柱套筒微调柱脚高度,可以适应池底排水坡度引起的标高变化.随时调整标高,确保面板各方向高差不超过5 mm.图4(a)还给出了钢架的侧向顶紧装置,通过旋转M24螺栓,可以将橡胶垫块与池壁顶紧,维持架体的水平稳定性;也可缓解温度应力,避免池壁面砖发生集中力作用下的局压破坏.制冷和解冻过程中,可以根据需要调整螺栓的松紧度.

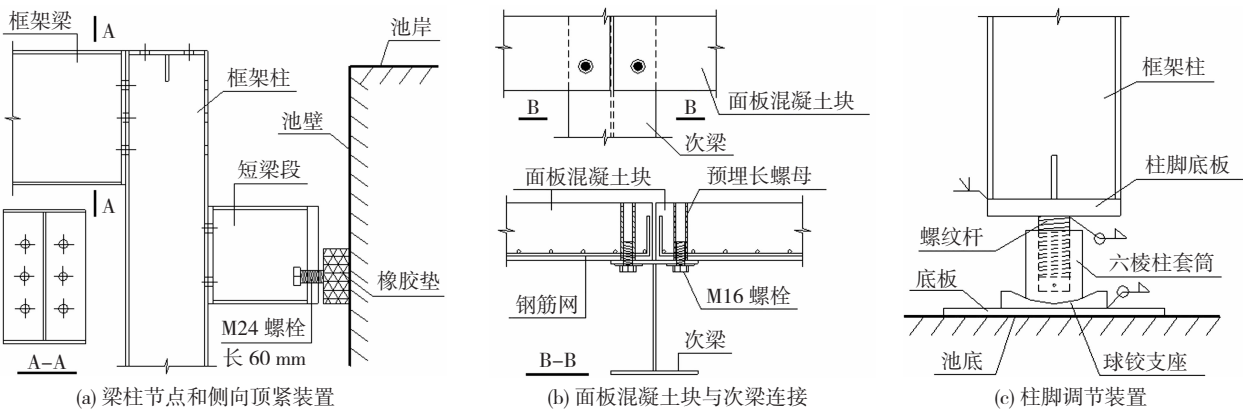


图 4 典型节点的细部构造

Fig. 4 Constructional details of typical connections

1.2 冰面作法

如图 3 所示,在找平后的面板单元上方铺设 30 mm 厚硬质挤塑板(XPS),密度 30 kg/m³,抗压弹性模量 6~7 MPa,导热系数 0.03 W/(m·K),用于解决混凝土面板与冰层之间的保温隔热问题.这种作法,可以使面板下方封闭的池内空间在较高的温度上达到热交换平衡,减小冰面与下部空间的热交换,节约能源;也会减小下部支承结构的热胀冷缩效应,减小温度变形和应力.在保温层上面铺设两层防水膜,然后架设制冷管,连通制冷机,再由专业制冰师喷洒纯净水,逐层制冰,最后达到 -8℃ 的 60 mm 厚度的冰层.

显然,从力学性能上看,这种作法的冰面下部存在着一层抗压刚度较小的挤塑板薄弱层,冰上荷载作用下的抗压刚度和承载能力均不如传统的永久冰上场地(图 2).永久场地一般将隔热层置于钢筋混凝土层下方,只要保证混凝土层的厚度(100~200 mm),刚度较小的隔热层不会对冰面产生显著影响.但已有研究成果表明,只要不使用大型浇冰设备(局部轮压较大),图 3 作法完全可以满足大部分冰上项目的比赛要求^[8],并逐渐开始应用于各类比赛.下文将结合现场试验和有限元分析结果详细论

述此类装配式冰场力学性能.

2 试验测试与有限元数值模拟

2.1 试验测试的主要内容

在水立方泳池场地中使用上述方案建造了图 3(b)所示的一个标准冰壶赛道,进行现场试验.在冰场建设过程中分别测试了支架构体的主次梁安装完成之后、混凝土面板安装完成之后及冰面完成之后结构的竖向变形和频率,也同时监测了主次梁关键点的应力.使用千分表测量结构变形,使用高精度加速度传感器测量人工激振作用下结构加速度时程,并通过傅里叶变换得到结构自振频率.利用现场剩余的面板混凝土块进行加载,见图 5(a)、(b),4 块面板约 3 kN,相当于 2~3 个冰壶及 3~4 个运动员汇聚于 0.4 m² 范围内的最不利情况,也相当于小型浇冰车装满水后的最大重量,故所施加荷载代表了冰场使用过程中可能出现的最大荷载,并作用于柱网区格中央的最不利位置上.浇冰的过程中,水面自动找平,结构自重引起的微小变形不会影响最终冰面的水平度,所以测量过程中只关心 3 kN 使用荷载作用下的变形增量,即相对变形.



图 5 现场试验的加载与测试

Fig. 5 Loading and testing schemes of field tests

为进一步检验此装配式冰场的力学性能,使用 50 kN 叉车模拟大型浇冰车在冰面作业,见图 5

(c).此荷载远大于各类冰上项目运动员竞技时所产生的使用荷载,仅存在于赛后的冰面维护阶段.探

讨在此极限荷载作用下装配式冰场的受力和变形特点,为冰上运动转换场地的建设和持续改进提供参考,以探索装配式冰场的使用范围. 此阶段主要监测最大轮压作用下柱网中心位置(刚度最弱位置)冰面的竖向变形及可能出现的冰面破坏情况.

2.2 有限元数值模拟方法

使用有限元分析可以在模拟试验结果的基础上,进一步探析人工冰场的竖向变形构成比例、高阶模态的振型和频率分布、冰层和保温层的应力分布规律、极端荷载作用下的冰层开裂机理等关键问题. 采用 Abaqus 软件建立了纵向 5 个柱跨、横向 3 个柱跨的赛道模型,进行数值模拟分析,见图 6. 梁、柱和支撑等使用两节点 B31 梁单元,面板混凝土块、挤塑板和冰层均采用 8 节点缩减积分的实体单元. 主梁与钢柱、次梁与主梁之间按实际情况通过释放节点转动自由度的方法实现铰接. 面板混凝土块的四角与次梁通过自由度耦合连接. 面板混凝土块和挤塑板之间、挤塑板与冰层下表面的防水膜之间均设置接触对. 法向为硬接触,切向为滑动摩擦接触,摩擦系数按聚苯乙烯材料性能,近似取 0.3^[10].

使用短刚臂模拟主、次梁叠接而引起的轴线偏移,由于面板混凝土块在四角与次梁上翼缘固定,为准确模拟主梁与面板块的组合作用(图 7),将刚臂长度设为主梁高度一半与次梁高度之和. 在竖向荷载作用下,下方的主梁受拉,上方的混凝土块受压,依靠刚臂抗剪维持平截面假定,形成组合梁的受力模式. 计算结果表明,由于该组合作用的存在,有效提高了主梁抗弯刚度,并对提高冰场整体竖向自振

频率也有贡献,建模中应予以考虑.

在使用荷载工况下,虽然钢柱、钢梁、面板混凝土块和挤塑板均未进入塑性,表 1 中仍然给出了各材料的基本参数、弹塑性模型和本构的定义,可用于下文的极限状态分析. 试验中使用纯净水分层浇冰,其性能与文献[12]所研究的淡水冰相似,故摩尔库伦弹塑性模型中 -8℃ 时的内摩擦角和粘聚力均采用该文献试验结果的插值.

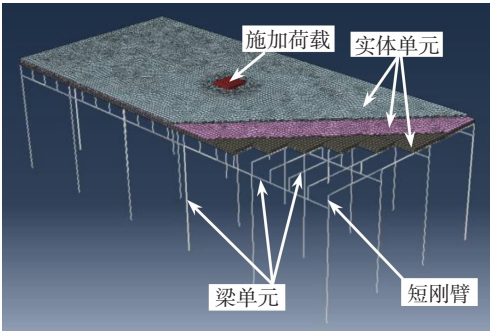


图 6 冰场整体计算模型

Fig. 6 Simulation model of the ice field

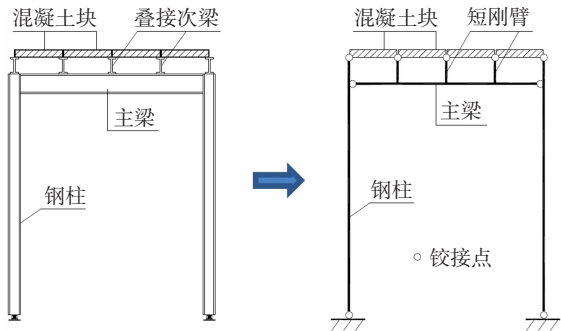


图 7 主梁与混凝土块的组合作用

Fig. 7 Combined actions of main beam and concrete blocks

表 1 数值模型的关键参数

Tab. 1 Constitutive parameters in numerical model

构件材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹塑性模型	本构参数
钢柱和钢梁	206 000	0.30	7 850	Mises 屈服准则和随动强化模型	屈服强度 235 MPa, 切线模量 0.01E
面板混凝土块	30 000	0.20	1 950	混凝土损伤塑性模型	按中国规范 C30 混凝土应力应变曲线 ^[5]
挤塑板 XPS	6.6 ^[11]	0.28	30	低密度泡沫超弹性模型	弹性
冰	500	0.30	917	摩尔库伦塑性模型	内摩擦角 8.12, 黏聚力 1.08 MPa ^[12]

3 使用荷载作用下的冰场性能

3.1 各阶段的竖向变形

图 8 给出了支承架体完成之后、混凝土面板完成之后及冰面完成之后在 3 kN 使用荷载作用下结构竖向变形的试验结果与数值模拟结果,可看出除了前两个阶段次梁跨中挠度模拟结果略小于试验值之外,主梁跨中及冰面变形均具有较好的模拟效果.

图 9 给出了冰场自重和 3 kN 使用荷载共同作用下整体结构变形云图,最大变形位于柱网区格中央施加荷载的位置. 表 2 给出了自重和使用荷载作

用下的最大总变形,及扣除自重后的变形增量. 可见冰面最大变形增量仅为 0.08 mm (试验值为 0.081 mm),仅为主梁跨度的 1/30 000,这种巨大的竖向刚度显然不会对冰上运动产生任何影响,运动员的试用反馈也证明了这一点. 也可以发现,此变形增量主要由下部支架的次梁和主梁弯曲挠度构成,其占比之和为 86.25%,而冰层自身的弯曲及压缩变形只占 10%,冰下挤塑板 XPS 的压缩占比仅为 3.75%,说明使用荷载作用下冰下挤塑板并不是影响冰场性能的主要因素,主、次梁的抗弯刚度才是影响冰场力学性能的决定性因素.

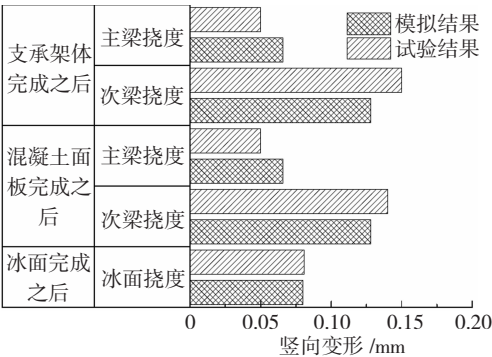


图 8 挠度的试验与模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of results of test and simulation deformation

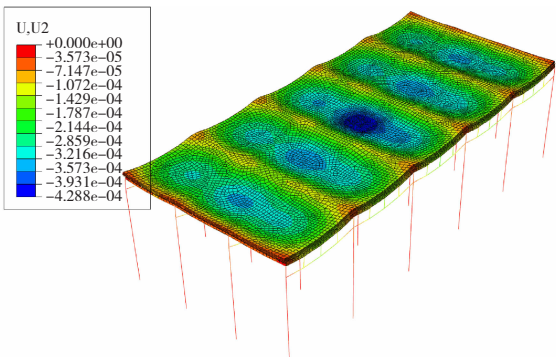


图 9 整体结构变形云图

Fig. 9 Deformation nephogram of the ice field

表 2 冰场的最大竖向变形

Tab. 2 Maximum vertical deformation of the ice field

mm

位置	总变形	自重下的变形	增量	各部分对变形增量的贡献
冰层	0.428 8	0.348 8	0.080 0 (0.081)	0.008 0[10.00%]
XPS	0.427 7	0.355 7	0.072 0	0.003 0[3.75%]
混凝土面板及次梁	0.424 6	0.355 6	0.069 0	0.025 8[32.25%]
主梁	0.366 6	0.323 4	0.043 2	0.043 2[54.00%]

注:圆括号内为试验值;方括号内为变形占比.

3.2 冰场的竖向自振频率

试验中在保持 3 kN 使用荷载作用于柱网中央,采用模拟运动员跳跃时的人工激励产生冰面振动,在柱网区格中心冰面(测点 1)、主梁跨中上方冰面(测点 2)和柱头上方冰面(测点 3)分别布置加速度传感器,拾取该处的加速度响应,并通过傅里叶变换得到冰场的竖向振动基频为 29.3 Hz,见图 10.受加速度传感器精度限制和人工激励频谱范围限制,试验中未测到冰场竖向振动的更高阶频率.

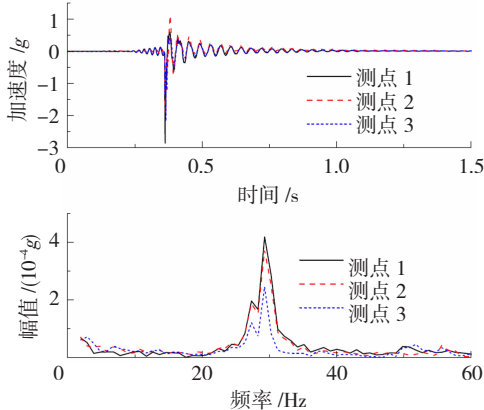


图 10 冰场频率测试结果

Fig. 10 Results of frequency tests of the ice rink

通过有限元数值模拟分析可以进一步研究结构的动力特性.此装配式冰场包含了多种材料,整体竖向刚度又较大,振型分析结果表明其属于振型密集型结构,见图 11.前 24 阶的频率均在 10.380 Hz 左右,均为主次梁等构件自身局部振动,荷载竖向作用时的振型参与系数和有效质量都极低,不会对整体结构产生影响.从第 25 阶振型开始,出现结构整体振型;从第 26 阶振型开始,振型参与系数的数值明

显增大.图 12 给出了第 26 ~ 29 阶振型及对应的频率.可以看出,在此频率附近存在大量高阶振型,但整体竖向自振频率计算值均不低于 29.257 Hz,与试验结果吻合极好.

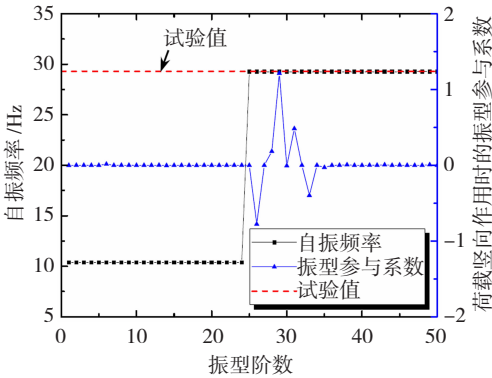


图 11 冰场频率及振型参与系数的计算结果

Fig. 11 Calculated results of frequencies and mode participation coefficients of the ice rink

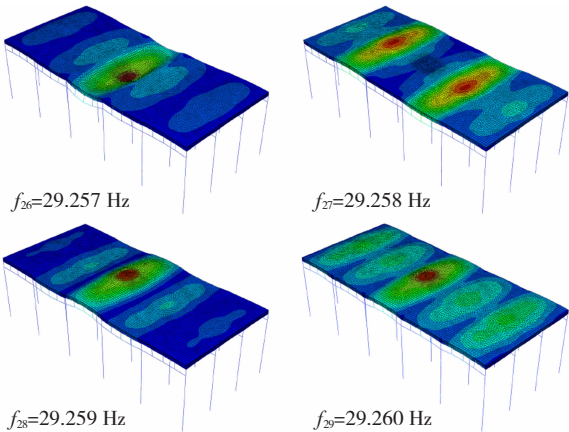


图 12 第 26 ~ 29 阶振型及对应的频率

Fig. 12 Mode shapes and frequencies from order 26th to 29th

试验与模拟分析结果均表明,所设计的冰场竖向自振频率显著高于各类临时场地和传统建筑物的楼板^[3,5],可为各类冰上运动提供一个近似刚性的地面。

3.3 装配式冰场关键组件的应力水平

在面板混凝土单元铺设完成之后,使用质量块逐级加载至使用荷载,测试了支承架体主、次梁跨中最大应力,见图 13。

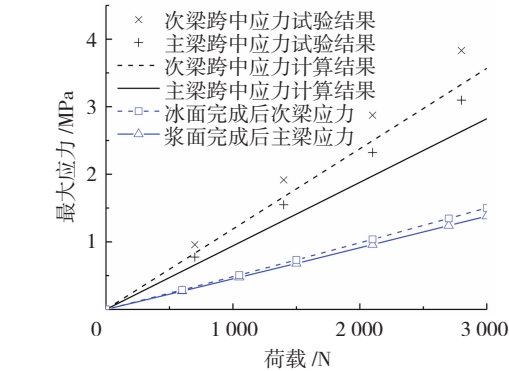


图 13 支承架体主、次梁最大应力

Fig. 13 Maximum stresses of main and secondary beams

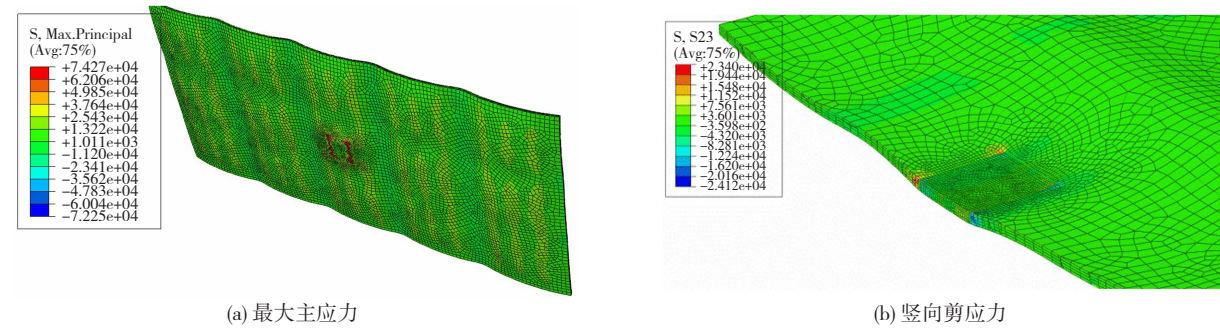


图 14 使用荷载作用下的冰层应力

Fig. 14 Stress in ice under service loads

4 极限荷载作用下的冰场性能

4.1 冰场在轮压下的变形

为检验所提冰场做法能否适用于大型冰车作业,现场试验中使用了 50 kN 叉车在冰场上缓慢行走.实测得到叉车轮胎与冰面的有效接触面积为 72 mm×200 mm,其中 200 mm 为轮胎有效宽度,单个前、后轮轮压分别约为 10 和 15 kN,四轮合计 50 kN.试验中测得了叉车前、后轮驶过某柱网中心(变形最大位置处)时,距轮胎边缘 150 mm 处的竖向变形与时间的关系曲线,见图 15 中的实线.前轮走过时实测最大竖向变形 0.19 mm,轮压更大的后轮走过时实测最大竖向变形为 0.36 mm.图中虚线也给出了相同位置处的有限元静力数值计算结果,由于叉车缓慢行走,模拟中未计入动力效应,但模拟结果仍较好体现了冰面竖向变形的两次峰值。

由于位移计无法布置到轮胎正下方的最大变形位置,实测结果会显著偏低.为准确观察冰面的真实

图 13 也同时给出了有限元数值模拟结果,与试验具有较高的吻合度,均呈现出次梁应力水平略高于主梁的趋势,但差别不大.图 13 也给出了冰面完成之后,在冰上加载时的计算结果,此时主、次梁应力均有较大幅度降低,说明挤塑板隔热层和冰层的存在有利于冰上集中荷载向下部的均匀扩散,使下部主、次梁等支承构件受力趋于均匀.当然,主、次梁构件的应力均较低,强度不起控制作用,梁的刚度是构件设计的关键因素。

3 kN 使用荷载作用在柱网中央 600 mm×600 mm 范围内时,冰层最不利应力出现在加载块周边的冰层下表面,以弯曲应力和剪应力为主,但应力水平较低,见图 14.下表面最不利位置的最大主应力、中间主应力和最小主应力分别为 67.27 kPa、61.01 kPa 和 -7.00 kPa,防止断裂安全系数 29.6,远未达到摩尔库伦准则的破坏条件.但如果存在作用面积更小、数值更大的集中荷载作用时,冰层应力值得进一步关注,例如下文大型冰车轮压作用。

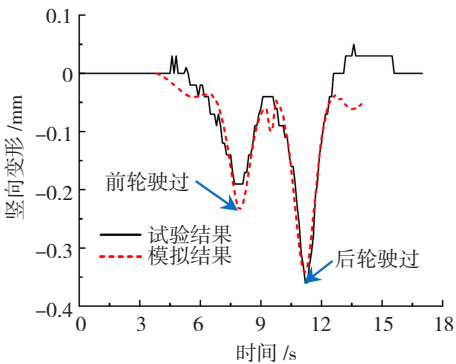


图 15 移动轮压作用下的柱网中心冰面竖向变形

Fig. 15 Vertical deformation of ice surface of column grid center under driving-wheel pressure

变形分布,图 16 给出了后轮位于柱网中心时刻的含冰场自重的竖向变形云图.将自重变形(-0.354 1 mm)扣除,轮压作用下的最大竖向变形为 -1.543 9 mm,约为主梁跨度的 1/1 500.虽然比值不大,但此变形明显不同于建筑结构中梁、板等的整体弯曲变形,可从图 16 中该时刻冰面总变形和冰层、XPS、混凝土板(次梁)、主梁各自变形曲线中清晰发现,轮压下

的变形主要以局部凹陷为主. 在跨中变形最大位置, 挤塑板(XPS)自身压缩变形占了总变形的 70.8%, 而下部框架主次梁和混凝土面板弯曲变形之和仅占总变形的 29.1%. 可见, 抗压刚度很低的挤塑板相当于冰层下方的软弱地基, 容易使冰面在局压作用下产生局部凹陷, 并易引发在剪力及局部弯矩联合作用下的冰层开裂.

4.2 冰面组件的应力分析

上文可知, 使用荷载作用下的钢架主、次梁的应力很小, 即使 15 kN 轮压作用时的荷载有所增加, 但钢架主次梁应力水平依然会较低. 图 17 分别给出了隐藏其他组件后刚架主次梁、混凝土面板单元和挤塑板的 Mises 应力云图及最大值, 应力均远未达到

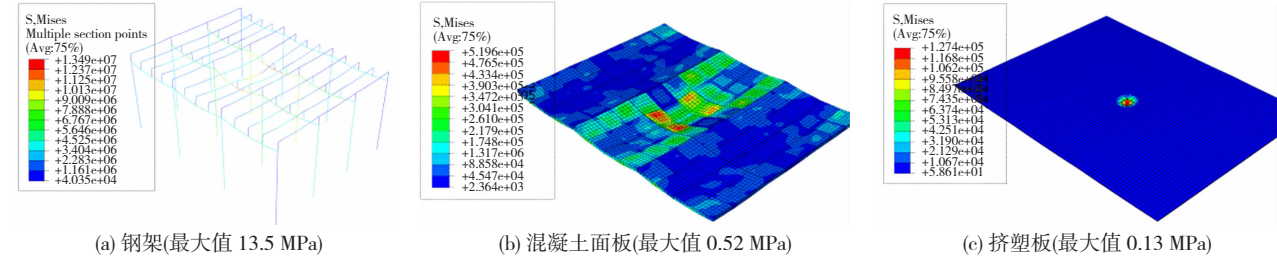


图 17 钢架、混凝土面板单元和挤塑板的应力云图

Fig. 17 Stress nephograms of steel frame, concrete blocks, and XPS

现场试验中虽然未测得冰层内的应力、应变分布, 但在叉车往复碾压或急刹车时, 轮胎下部的冰层内观察到了局部开裂现象(图 18), 而叉车缓慢匀速行驶时一般不会出现开裂现象, 据此可以推断冰层在轮压静力作用下的破坏荷载应略高于 15 kN. 图 19 给出了 15 kN 轮压作用下数值计算得到的弯曲应力和剪应力云图, 也给出了柱网中央冰面最大竖向变形和最大等效塑性应变与荷载的关系曲线. 也可看出 15 kN 轮压时冰层尚未发展塑性, 直到轮压超过 16 kN 以后, 轮压位置的冰层下表面受拉区开始发生破坏, 并产生显著等效塑性应变, 荷载位移曲线也呈轻微非线性变化. 冰属于脆性材料, 一旦达到摩尔库伦破坏准则, 就会发生开裂破坏, 这也合理解释了叉车往复碾压或急刹车时冰层内会产生较多裂缝的原因.

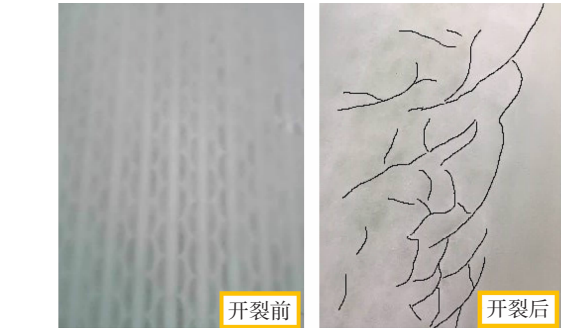


图 18 冰面开裂前后对比

Fig. 18 Ice surface photos before and after cracking

各自材料的屈服强度.

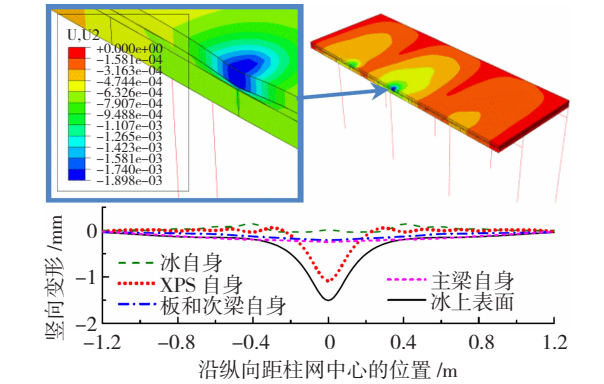


图 16 最大轮压作用下的柱网中心变形及组成

Fig. 16 Deformation and its composition of column grid center under maximum wheel load

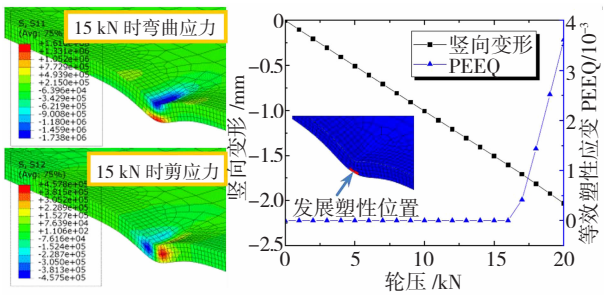


图 19 轮压作用下冰层的应力、应变和变形

Fig. 19 Stress, strain, and deformation in ice layer under wheel load

4.3 关键参数对冰层承载力的影响分析

冰下挤塑板越厚, 保温效果越好, 制冷机的能量消耗越少, 有时也会采用更厚的挤塑板保温层. 但由于挤塑板抗压刚度较小, 其自身压缩变形占轮压作用下总体变形的绝大比例, 较厚的挤塑板将直接影响冰层的承载力. 本节在 30 mm 挤塑板厚度的基础上, 补充分析了轮胎局压作用下挤塑板厚度为 50、70 和 90 mm 时的情况, 此时冰层厚度均为 60 mm. 从图 20 可知, 挤塑板越厚, 冰层开裂荷载和冰场竖向弹性刚度都呈显著越低趋势. 挤塑板从 30 mm 增加到 90 mm 时, 开裂承载力降低了 14.7%, 竖向弹性刚度降低了 26.1%. 因此, 在满足保温要求的前提下, 尽量使用厚度较小挤塑板是提高冰面强度和刚度的有效措施. 另外, 提高冰层厚度可有助于扩散冰面集中压力, 并减小集中荷载作用处冰层下表面

的弯曲拉应力,增加冰层抗弯能力. 图 21 给出了挤塑板厚度为 30 mm 时,开裂荷载和弹性刚度随冰层厚度的变化规律. 可以看出,随冰层厚度的增加,开裂荷载和竖向弹性刚度均显著增加. 冰层厚度从 40 mm 增加到 70 mm 时,轮压荷载作用下的承载力增加了 73.9%,弹性刚度增加了 38.3%. 当然,冰层厚度的增加,会带来制冰和维持冰温时的能量消耗,建议在制冷设备输出功率增加不多的情况下,优先选用较厚的冰层.

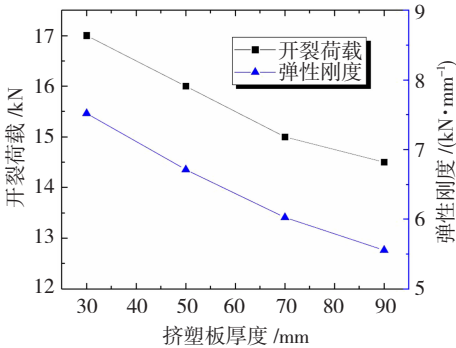


图 20 挤塑板厚度的影响

Fig. 20 Effects of XPS thickness

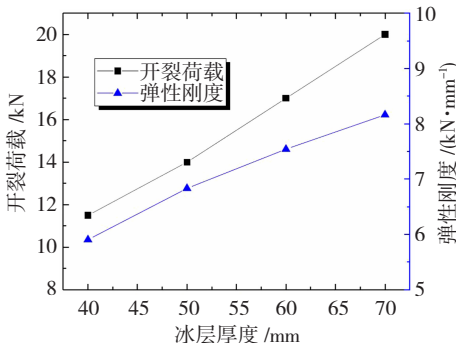


图 21 冰层厚度的影响

Fig. 21 Effects of ice thickness

5 结 论

1)提出了一种全装配式冰壶场地及支承结构体系的构造作法,并通过现场试验和有限元数值模拟分析验证了此冰场结构的可行性.

2)在运动员使用荷载及小型浇冰车维护荷载作用下冰场的竖向变形小、刚度大、自振频率高、各组件的应力水平低,完全可以满足冰壶等类似比赛的要求.

3)均布的使用荷载作用下挤塑板压缩引起的冰面变形比例很低,支承架体是影响冰场力学性能的决定因素;而轮压极限荷载作用下挤塑板自身压缩变形占据了绝大比例.

4)在大型浇冰车较大轮压作用下,下部支承结构应力和变形比例较低,但冰下挤塑板引起的压缩变形不容忽视,会诱发冰面开裂,应选用轻型浇冰设备.

5)增加冰下挤塑板厚度,将显著降低冰层开裂荷载和竖向弹性刚度;而增加冰层厚度,可以有效提升冰层开裂荷载和竖向弹性刚度.

参考文献

[1] 吴耀辉,朱鸣,秦杰,等. 哈尔滨万达茂室内滑雪场雪道基层抗滑移能力及破坏模式研究[J]. 建筑技术,2016,47(12):1137
WU Yaohui, ZHU Ming, QIN Jie, et al. Study on skid resistance and failure mode of ski track base in Harbin Wanda mall indoor ski rink[J]. Architecture Technology,2016,47(12):1137

[2] 演出场所安全技术要求,第2部分:临时搭建演出场所舞台、看台安全技术要求: WH/T 42—2011 [S]. 北京:中国标准出版社,2011:3
Perform site safety technical standards—Part 2: Temporary perform site safety technical standards for stage and stand: WH/T 42—2011 [S]. Beijing: Standards Press of China,2011:3

[3] DE BRITO V L, PENA A N, PIMENTEL R L, et al. Modal tests and model updating for vibration analysis of temporary grandstand [J]. Advances in Structural Engineering,2014,17(5):721

[4] SALYARDS K A, NOSS N C. Experimental evaluation of the influence of human-structure interaction for vibration serviceability [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014,28(3):458

[5] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:13
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2011:13

[6] MURRAY T M, ALLEN D E, UNGAR E E. Steel design guide series, No. 11: floor vibrations due to human activity [M]. Chicago: AISC,2003:39

[7] Institution of Structural Engineers. Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action: recommendations for management design and assessment [M]. London: Institution of Structural Engineers,2008:2

[8] 张文元,杨奇勇,余泰西,等. 可装配式冰场钢木组合支撑结构的力学性能研究[J]. 建筑结构,2018,48(10):30
ZHANG Wenyuan, YANG Qiyong, YU Taixi, et al. Research on mechanical properties of an assembled ice rink with steel and wood composite support[J]. Building Structure,2018,48(10):30

[9] ASHRAE. ASHRAE handbook—Refrigeration [M]. Atlanta: ASHRAE,2018:44. 10

[10] 杨保平,李鑫,慕波,等. 甲基硅油微胶囊/聚苯乙烯复合材料及其摩擦学性能[J]. 高分子材料科学与工程,2017,33(9):86
YANG Baoping, LI Xin, MU Bo, et al. Preparation and tribological properties of methyl silicone oil microcapsule/polystyrene composites [J]. Polymer Materials Science and Engineering,2017,33(9):86

[11] 秦培成,查晓雄,于航. 挤塑材料本构关系及其在夹芯板中的应用[J]. 建筑材料学报,2008,11(2):169
QIN Peicheng, ZHA Xiaoxiong, YU Hang. Study on constitutive relationship model of plastic extrusion foam material and its application in sandwich panels[J]. Journal of Building Materials, 2008,11(2):169

[12] 单仁亮,白瑶,黄鹏程,等. 三向受力条件下淡水冰破坏准则研究[J]. 力学学报,2017,49(2):471
SHAN Renliang, BAI Yao, HUANG Pengcheng, et al. Experimental research on failure criteria of freshwater ice under triaxial compressive stress [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2017,49(2):471