

冷库地基基础方案选型与优化研究

张永鑫¹ 吴银存²

1. 华商国际工程有限公司 北京 100069

2. 中粮科工(北京)工程管理有限公司 北京 100069

摘要: 冷库建筑因长期低温、重载、高湿度的运营特性,对地基基础的稳定性、抗冻胀性及耐久性提出严苛要求。地基基础作为冷库结构安全的核心载体,其选型合理性直接影响建筑使用寿命、运营安全性及综合造价。本文结合冷库工程设计特点,分析地基基础设计的核心制约因素,系统梳理天然地基、桩基础、筏板基础等常见选型方案及适用场景,提出基于地质条件、荷载特征、经济成本的多维度优化策略,并结合工程案例验证优化方案的可行性,为冷库地基基础设计提供理论参考与实践指导。

关键词: 地基基础; 选型分析; 冻胀防控; 优化策略

引言

随着冷链物流行业的快速发展,冷库建筑的建设规模不断扩大,结构形式日趋复杂,对地基基础工程的设计标准提出更高要求。冷库长期处于 -20°C ~ 0°C 的低温环境,内外温差显著,伴随重载堆垛、高湿度冷凝等问题,易引发地基冻胀融沉、不均匀沉降、结构开裂等病害,严重影响冷库正常运营。据行业统计,约30%的冷库结构故障源于地基基础设计不合理或施工不到位,因此,针对冷库特性开展地基基础选型与优化研究,实现安全可靠性与经济合理性的平衡,具有重要的工程价值。

当前,国内外学者针对冷库地基基础的研究多聚焦于冻胀防控技术,如垫层处理、保温隔冻设计等,但缺乏对不同地质条件、冷库规模下选型方案的系统性对比,以及多目标优化模型的构建。本文基于冷库工程设计实践,整合地质勘察、结构力学及造价分析等多学科知识,完善选型体系,优化设计方案,为同类工程提供借鉴。

一、冷库地基基础设计的核心制约因素

1.1 低温冻胀与融沉作用

低温是冷库地基基础面临的首要挑战。冷库室内低温通过地坪向地基土传导,当土层温度降至冻结点以下时,土中自由水与结合水依次冻结,体积膨胀(冻胀率可达5%~15%),对基础产生向上的冻胀力;若制冷系统故障、保温层破损或季节温度波动,冻土融化会导致土层孔隙率增大、承载力下降,引发地基融沉,造成地坪开裂、货架倾斜、墙体渗漏等问题。冻胀与融沉的反复

作用,会加剧地基基础的疲劳损伤,缩短建筑使用寿命。

冻胀风险的大小与土层类型、含水量、地下水位密切相关:粉质黏土、黏质粉土因含水量高、颗粒细腻,冻胀性最强;砂土、碎石土因孔隙大、水分易渗透,冻胀性较弱;地下水位越高,土层含水量越充足,冻胀危害越严重。

1.2 重载与不均匀荷载特征

冷库运营期间,地基需承受多重荷载作用,包括货架及货物的静荷载(堆垛高度可达8~15m,荷载密度达 $20\sim 50\text{kN/m}^2$)、叉车等运输设备的动荷载(冲击系数1.2~1.5)、制冷机组及管道的集中荷载。这些荷载具有分布不均、局部应力集中的特点,若地基承载力不足或刚度分布不均,易引发局部沉降差过大,导致地坪开裂、结构变形,影响设备正常运行。

此外,冷库结构多采用钢结构或钢筋混凝土框架结构,上部结构刚度较大,对地基不均匀沉降的敏感性较高,要求地基基础具备良好的整体刚度,控制沉降差在规范允许范围内。

1.3 高湿度与地下水侵蚀

冷库内外温差可达 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$,室内高湿度空气接触低温地坪后易产生冷凝水,渗透至地基土层中,导致土层软化、承载力下降;若地下水位较高,地下水会通过毛细作用上升至地基表层,加剧土层含水量超标,同时可能携带盐分、腐蚀性介质,对基础混凝土、钢筋产生侵蚀,降低基础耐久性。

对于采用架空地坪的冷库,地下空间通风不畅,湿度易积聚,进一步加速基础构件的锈蚀与老化,需针对

性采取防水、防腐及通风措施。

1.4 场地地质条件差异

场地地质条件是地基基础选型的核心依据，不同土层的物理力学性质差异显著：软土承载力低、压缩性高，易产生不均匀沉降；砂土渗透性强，需防范地震作用下的液化风险；岩石地基承载力高、稳定性好，但开挖难度大、造价高。地下水位埋深、土层分布均匀性、不良地质现象等，也会直接影响基础选型与施工方案。

二、冷库地基基础常见选型方案及适用条件

2.1 天然地基+垫层处理方案

2.1.1 适用条件

该方案适用于场地土层承载力满足设计要求、地下水位较低、土层冻胀性弱的中小型冷库。不适用于软土、粉质黏土等冻胀性强或承载力不足的场地。

2.1.2 设计要点

地基处理以垫层置换为主，选用级配良好的中粗砂、碎石、灰土等材料，铺设厚度0.5~1.5m，分层碾压密实（压实系数 ≥ 0.95 ），目的是提高地基承载力、降低土层含水量、减弱冻胀作用^[1]。垫层材料需具备良好的透水性，便于排水，避免水分积聚引发冻胀。

地坪设计需配套保温隔冻层，通常采用XPS挤塑板、聚氨酯硬泡等保温材料，铺设在垫层上方、混凝土面层下方，厚度根据室内温度确定，同时设置防潮层，阻断冷凝水渗透。

2.2 桩基础方案

2.2.1 适用条件

适用于软土、粉质黏土等承载力不足的场地，或地下水位较高、冻胀性强的区域，以及大型冷库、跨度大的冷库结构。桩基础可将荷载传递至深层稳定土层，有效控制不均匀沉降与冻胀影响^[2]。

2.2.2 桩型选择与设计要点

冷库桩基础常用桩型包括预制混凝土方桩、PHC管桩、钻孔灌注桩，具体选择需结合地质条件与造价：PHC管桩抗压强度高、施工速度快，适用于砂性土、黏性土场地；钻孔灌注桩适应性强，可穿越复杂土层，适用于存在暗沟、溶洞的场地，但施工周期长、造价较高。

设计时需控制桩端进入稳定土层的深度，避开冻胀影响层；桩间距根据荷载大小与土层承载力确定，通常为3~5倍桩径，同时设置桩承台，增强基础整体性。对于高冻胀场地，可在承台下方铺设砂垫层，吸收部分冻胀变形，减小冻胀力对桩体的作用。

2.3 筏板基础方案

2.3.1 适用条件

适用于土层分布不均、荷载较大且对不均匀沉降控制严格的冷库，如多层冷库、大型综合冷链中心。筏板基础通过大面积钢筋混凝土板与地基接触，分散荷载，减少局部应力集中，具备良好的整体刚度，可有效适应地基变形。

该方案不适用于地下水位过高、软土厚度过大的场地，否则需配合降水、地基处理等措施，导致造价大幅增加。

2.3.2 设计要点

筏板厚度根据荷载大小、跨度及配筋情况确定，一般为0.8~2.0m，采用双向双层配筋，增强抗裂性与承载力。对于冻胀性场地，筏板下方需设置保温隔冻层与排水垫层，同时在筏板边缘设置防冻胀裙边，阻断冻胀力对基础的侧向作用。

若场地地下水位较高，需在筏板下方设置抗浮桩或排水盲沟，控制地下水对基础的浮力，避免基础上浮变形。

2.4 组合基础方案

对于地质条件复杂、荷载分布极不均匀的大型冷库，可采用组合基础方案，如桩-筏联合基础、桩-承台-垫层联合基础。桩-筏联合基础结合了桩基础与筏板基础的优势，通过桩体承担主要荷载，筏板分散局部荷载、调整不均匀沉降，适用于软土地区大型冷库；桩-承台-垫层联合基础则在桩承台下方铺设垫层，兼顾承载力与抗冻胀性能，适用于冻胀性较强的中等荷载冷库。

三、冷库地基基础选型优化策略

3.1 基于地质条件的针对性优化

地质勘察是选型优化的前提，需详细探明土层分布、含水量、冻深、地下水位、地基承载力等参数，针对性制定方案：对于冻胀性强的粉质黏土地场，优先采用桩基础穿越冻胀层，或采用换填垫层+保温隔冻层组合处理，降低冻胀风险；对于软土地场，采用CFG桩复合地基替代传统桩基础，提高地基承载力的同时控制造价；对于岩石地基，可采用浅埋筏板基础，减少开挖工程量。对于松散砂土地基，因其抗剪强度低且易受动荷载影响，可采用振冲碎石桩或挤密砂桩进行加固处理；地下水位较高时，优化排水系统设计，采用集水井降水、排水盲沟+土工布过滤等措施，降低地下水位至冻深以下，同时增强基础防水、防腐性能，选用抗渗混凝土、耐腐蚀钢筋，延长基础使用寿命^[3]。

3.2 基于荷载特征的刚度优化

根据冷库荷载分布特点,优化基础刚度分布:对于货架集中荷载区域,局部增大筏板厚度或增设桩体,提高局部承载力;对于叉车行驶通道,增强地坪配筋强度,设置伸缩缝与沉降缝,减少动荷载引发的开裂。

采用有限元模拟技术,对地基基础受力与变形进行仿真分析,优化基础尺寸、配筋及桩位布置,确保基础在静荷载、动荷载作用下的沉降量、沉降差满足规范要求。例如,针对冷库周期性堆垛荷载与叉车动荷载的耦合作用,有限元模型引入时程分析模块,模拟荷载随时间变化的响应,优化局部构件的刚度匹配^[4]。对于大跨度冷库的无柱区域,利用有限元拓扑优化技术,在满足承载力要求的前提下,删减冗余的基础配筋、桩体布置,如将货架区桩间距由1.8m调整为2.2m,可降低基础沉降差,保证结构安全。

3.3 基于抗冻胀的保温隔冻优化

抗冻胀优化的核心是阻断低温传导、控制土层含水量,具体措施包括:优化保温层设计,采用“保温层+防潮层”复合结构,保温材料选用抗压强度高、导热系数低的XPS挤塑板或聚氨酯硬泡,同时在地坪边缘、墙角等易受冻区域增设保温层厚度,避免局部冻胀;对于天然地基,增大砂垫层厚度,提高排水性能,减少土层冻结合水量;对于桩基础,在承台与土层之间设置柔性垫层(如聚苯板),缓冲冻胀力对桩体与承台的作用。

保温层厚度结合冷库室内设计温度、当地多年平均地下冻结深度、土壤导热系数确定。如室内温度为-18℃的冷库,在地下水位较高的粉质黏土地层中,XPS挤塑板保温层临界厚度应不小于120mm,墙角、地坪边缘等热桥区域。在此基础上增加30%~50%厚度。防潮层优先选用耐低温、抗穿刺的SBS改性沥青防水卷材或HDPE土工膜,铺设时需保证接缝严密,搭接宽度不小于100mm,防止地下水汽渗透导致保温层受潮失效。天然地基的砂垫层厚度应根据土层冻结敏感性确定,对于强冻胀性土,砂垫层厚度不宜小于800mm,采用级配良好的中粗砂,分层碾压密实,形成排水通道,减少土层中自由水含量。桩基础的柔性垫层除聚苯板外,还可采用橡胶隔震垫,弹性模量与桩-土体系匹配,在桩周2m范围内的土层中掺入5%~8%的水泥或石灰,形成固化层,降低土的冻胀敏感性^[5]。此外,可采用主动控温技术,在地基中铺设加热电缆,冬季维持土层温度在冻结点以上,从根源上消除冻胀风险,适用于冻胀性极强的特殊场地。

3.4 基于经济成本的综合优化

选型优化需兼顾安全与经济,建立多方案造价对比模型,涵盖地基处理、基础施工、材料消耗、工期等因素:中小型冷库若地质条件良好,优先选用天然地基+垫层方案,造价较桩基础低30%~50%;大型冷库若需采用桩基础,优先选用PHC管桩替代钻孔灌注桩,缩短施工周期,降低造价。

同时,优化施工工艺,采用预制构件减少现场浇筑工程量,提高施工效率;合理安排施工季节,避开雨季、冬季,减少降水、防冻措施费用。例如,在非冻期施工,可避免地基冻结引发的施工难度增加,降低施工成本。

四、结论与展望

4.1 结论

冷库地基基础的选型与优化需紧密结合场地地质条件、荷载特征、冻胀风险及经济成本,核心在于防控冻胀融沉与不均匀沉降。天然地基+垫层方案适用于地质条件良好的中小型冷库;桩基础方案适用于软土、高冻胀场地及大型冷库;筏板基础与组合基础方案适用于荷载不均、对沉降控制严格的复杂场景。通过针对性优化地质处理、保温隔冻、刚度分布及施工工艺,可实现地基基础安全可靠、经济合理的设计目标。

4.2 展望

未来,随着冷链行业向大型化、智能化方向发展,冷库地基基础设计将面临更高的荷载要求与更复杂的地质条件。建议进一步开展以下研究:一是研发新型保温隔冻材料与复合地基处理技术,提高抗冻胀性能与耐久性;二是结合BIM、大数据技术,构建地基基础选型优化的智能化模型,实现设计方案的精准匹配;三是加强长期监测与运维研究,建立地基基础病害预警机制,延长冷库使用寿命。

参考文献

- [1]GB 50007-2011, 建筑地基基础设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2]GB 50072-2010, 冷库设计规范[S].北京:中国计划出版社,2010.
- [3]张吉人.冷库地基基础冻胀防控技术研究[J].建筑结构,2019,49(S1):892-895.
- [4]李建国.软土地区大型冷库桩-筏基础设计与优化[J].岩土工程学报,2020,42(增刊2):168-171.
- [5]王强.冷库地坪保温隔冻系统设计与施工要点[J].制冷与空调,2021,21(5):67-70.