

仓顶盖中心立柱加贝雷梁支撑体系的受力分析与验算

刘小鹏

中国五冶集团有限公司，四川 成都 610000

[摘要]仓顶盖结构支撑体系的安全性对整个仓储结构的稳固性有着直接影响，中心立柱加贝雷梁支撑体系具备适应性良好、组装方便、高承载力等诸多优势在大跨度仓顶盖的施工中得到了广泛的应用。文章研究基于贝雷梁与中心立柱的结构特性，对该支撑体系的受力进行了系统的剖析，着重围绕贝雷梁、中心立柱、节点连接部位开展关于刚度、强度、稳定性的验算，同时提出针对性的支撑体系优化相关建议，确保工程的质量。

[关键词]仓顶盖；中心立柱；贝雷梁；支撑体系；受力分析；强度验算

DOI: 10.33142/aem.v7i12.18652 中图分类号: U441 文献标识码: A

Stress Analysis and Verification of the Center Column and Berea Beam Support System of the Warehouse Roof Cover

LIU Xiaopeng

China MCC5 Group Corp. Ltd., Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: The safety of the support system for the warehouse roof structure has a direct impact on the stability of the entire storage structure. The center column and Berea beam support system has many advantages such as good adaptability, easy assembly, and high bearing capacity, and has been widely used in the construction of large-span warehouse roofs. The article systematically analyzes the stress of the support system based on the structural characteristics of the Berea beam and the central column, focusing on the stiffness, strength, and stability calculations of the Berea beam, central column, and node connection parts. At the same time, targeted optimization suggestions for the support system are proposed to ensure the quality of the project.

Keywords: warehouse top cover; central pillar; Berea beam; supporting system; force analysis; strength verification

引言

仓顶盖是仓库不可或缺的关键构成部分，在承受自重的同时，需要承受风雪荷载、温度应力、活荷载等，在工程设计中对支撑体系进行合理规划设计与安全验算是重要环节。中心立柱加贝雷梁支撑体系里，中心立柱是竖向承重的核心部分，贝雷梁承担着水平方向的承重任务，并作为传力构件发挥作用，由节点相互连接，进而构建成一个完整的受力体系，可切实满足仓顶盖在不均匀荷载作用下、大跨度的受力要求。若支撑体系设计不合理，验算工作未落实到位，极易引发工程事故，例如地基沉降、贝雷梁弯曲变形等，对仓库结构的安全性造成严重影响。因此本文研究对其荷载传递规律与各构件的受力特性进行深入分析，建立一套全面覆盖构件强度、刚度、稳定性，以及节点和地基的验算体系，旨在为工程领域提供科学合理的设计与验算依据，推动工程建设向更高效、更安全的方向发展。

1 仓顶盖中心立柱加贝雷梁支撑体系的结构构成

仓顶盖中心立柱加贝雷梁支撑体系是空间受力体系，由竖向承重（中心立柱）、水平承重与传力（贝雷梁）、节点连接构件及地基基础组成，各构件协同共同达成荷载的合理传递以及支撑体系的稳定受力。中心立柱承担贝雷梁

传递的竖向荷载及水平荷载产生的弯矩与剪力，其常用型钢立柱，在部分承受较大荷载的工程场景中，可选用组合型钢立柱。中心立柱的高度往往会严格与仓顶盖的净空高度保持一致，柱顶和贝雷梁借助节点实现连接，常见的连接形式有铰接、刚接等。贝雷梁主要承受来自仓顶盖自身重量、风雪等产生的水平方向上的分布荷载，并且将荷载均衡地传递到中心立柱上。贝雷梁一般是由贝雷片以及连接件拼装组合而成，贝雷片通常选用 16Mn 低合金钢进行加工制造。通常情况下，贝雷梁的布置模式为辐射式与双向交叉式这两种，防止出现局部受力过度集中的现象。节点连接构件作为支撑体系里承受关键作用力的部件，贝雷梁和中心立柱相连接的节点，通常采用刚接或者铰接的连接方式，贝雷片之间的连接，通常选用标准化的销钉或者螺栓作为连接件，贝雷梁和仓顶盖的连接方式，通常选取柔性连接或者刚性连接。地基基础主要对中心立柱传递的竖向荷载和水平荷载起到承载作用，维持整个支撑体系竖向的稳固性。地基基础的形式选定，需以荷载大小与地质条件为重要参考依据，常见的基础形式涵盖独立基础、桩基础等类型。

2 仓顶盖中心立柱加贝雷梁支撑体系的受力分析

2.1 荷载组成与分类

支撑体系受到的荷载作用主要有竖向荷载、水平荷载

与温度应力，其中在支撑体系所受荷载中，竖向荷载是最为关键的荷载类型，直接对各构件的竖向受力状态起到决定性作用，包括以下几类：①自重荷载：支撑体系自身重以及仓顶盖的自重；②活荷载：仓顶盖在投入使用阶段所产生的各类临时性荷载，诸如施工作业人员所承载的荷载、物料堆积所造成的荷载、检修设备所导致的荷载等；③风雪荷载：属于自然方面的荷载，其大小与当地的气候密切相关。水平荷载主要对支撑体系水平方向产生作用，影响支撑体系的水平稳定性，主要包括风荷载、地震荷载以及顶盖使用过程中产生的水平推力（如物料侧压力、检修设备的水平作用力）。温度应力是因环境温度发生改变而产生的，引发支撑体系各构件产生热胀冷缩的物理变化，产生内应力。贝雷梁与中心立柱所采用的钢材，其热膨胀系数相对较大，当温度应力过大时，致使构件开裂、节点结构被破坏。温度应力的大小与温度变化的幅度、构件自身的长度以及约束条件存在关联。因此，需要结合当地的温度变化精确计算对各个构件所产生的影响。

2.2 各构件受力状态分析

2.2.1 贝雷梁受力状态

贝雷梁主要承受竖向荷载与水平荷载协同作用产生的效应，其受力状态主要涵盖以下几个方面：（1）竖向受力。受到竖向方向荷载影响时，贝雷梁的上弦杆主要承受由荷载引发的压力作用，腹杆在结构受力时，会承受剪力，亦或承受轴力，下弦杆承担着因结构承载而产生的拉应力，贝雷梁将会出现竖向的弯曲变形情况，因此需要对其的弯曲强度以及竖向刚度进行验算。（2）水平受力：贝雷梁承受由水平荷载作用而引发的水平推力，贝雷梁在水平荷载的影响下将产生水平向的弯曲变形，承受水平方向上的剪力以及弯矩作用。因此需要对其的水平刚度与弯曲强度进行验算。（3）局部受力：贝雷片之间用于连接的节点承受着局部产生的剪力与轴力，因此需要对连接节点的抗剪切能力、强度进行验算。

2.2.2 中心立柱受力状态

中心立柱主要承受竖向荷载与水平荷载共同作用产生的力学效应，其受力状态有以下几个方面：（1）竖向受力：中心立柱在竖向轴力作用下发生压缩变形，若贝雷梁的布置存在不对称情况或荷载分布不均匀，中心立柱将承受由荷载偏心作用引发的偏心压力载荷而产生弯曲变形。

（2）水平受力：中心立柱在水平剪力作用下发生剪切变形，在水平弯矩作用下发生弯曲变形，因此，需要对中心立柱的弯曲强度、抗剪强度以及疲劳强度进行分析。（3）局部受力：中心立柱的柱顶连接节点与柱底连接节点要承受局部剪力、弯矩以及轴力的协同作用，节点处存在受力集中的状况，因此需要对节点连接的可靠性与强度进行验算。

2.2.3 节点连接构件受力状态

节点连接构件是荷载传递关键，多呈局部受力集中，

不同节点受力有差异：（1）贝雷梁与中心立柱连接节点：若节点采用铰接，连接件主要承受剪切力作用，节点板承受着局部范围内产生的压应力；若节点采用刚接构造，需要承担弯矩、剪力以及轴力，节点所涉及的连接件承受剪切力和拉力带来的力学影响（2）贝雷片之间连接节点：采用销钉或者螺栓进行连接，主要承担剪切力以及少量的轴力，其连接孔处会承受因受力集中而引发的局部压应力。

（3）贝雷梁与仓顶盖连接节点：节点采用刚性连接方式时，承担弯矩与剪力的传递，连接件承受着由外部作用力引发的剪切力以及拉力；当采用柔性连接方式时连接件主要承受由外部载荷或结构作用所引发的剪切力，节点仅传递剪力。

3 仓顶盖中心立柱加贝雷梁支撑体系的验算

3.1 贝雷梁的验算

贝雷梁强度验算主要针对贝雷片弦杆、腹杆及连接节点，验算其在荷载下拉、压、剪应力，确保不超材料允许强度。贝雷梁为桁架结构，可按其计算方法算出各杆件轴力（拉/压力）、剪力与弯矩，再结合截面面积验算实际应力。弦杆强度验算的实际应力公式为 $\sigma=N/A$ (σ 为实际应力, MPa; N 为轴力, N; A 为截面面积, mm²)。验算时，拉应力 $\sigma \leq [\sigma_t]$ (材料允许拉应力)，压应力 $\sigma \leq [\sigma_c]$ (材料允许压应力)。腹杆强度验算：在结构受力时，斜、竖腹杆会受到剪力或轴力的影响，斜腹杆常常承受拉、压两种力，竖腹杆主要承受剪力。实际应力计算与弦杆相同，要确保不超材料允许强度。受剪力的腹杆，还需验算抗剪切强度，公式为 $\tau=V/A_v$ (τ 为剪切应力, MPa; V 为剪力, N; A_v 为抗剪切截面面积, mm²)，确保 $\tau \leq [\tau]$ (材料允许剪切应力)。贝雷片连接孔处受力集中，需验算局部压应力，公式为 $\sigma_c=F/A_{oc}$ (σ_c 为局部压应力, MPa; F 为压力, N; A_{oc} 为局部承压截面面积, mm²)，确保 $\sigma_c \leq [\sigma_c]$ (材料允许局部压应力)。

贝雷梁的刚度验算，在一般工程情形中，贝雷梁竖向允许挠度往往取其跨度的 1/250 到 1/300，均布荷载下 $f_{max}=5ql^4/(384EI)$ ，集中荷载下 $f_{max}=Pl^3/(3EI)$ (f_{max} 单位 mm, q 单位 N/mm, P 单位 N, l 单位 mm, E 单位 MPa, I 单位 mm⁴)，需确保 $f_{max} \leq [f]$ (允许竖向挠度)。

贝雷梁稳定性验算主要针对受压弦杆与腹杆，采用欧拉或经验公式验算受压杆件临界压力，需将其与实际轴力展开对比分析，充分考量长细比对验算带来的影响 $\lambda=l_0/i$ (λ 为长细比, l_0 为计算长度, mm; i 为截面回转半径, mm)。 l_0 依支撑条件定，弦杆取贝雷片节间长，腹杆取两端节点间距。临界压力计算中，长细比大 ($\lambda \geq \lambda_p$, λ_p 为比例极限长细比) 用欧拉公式 $F_{cr}=\pi^2 EI/l_0^2$ (F_{cr} 为临界压カ, N)；长细比小 ($\lambda < \lambda_p$) 用经验公式，结合屈服强度确定临界压力。稳定性的验算按 $N/F_{cr} \leq 1/\phi$ (ϕ 为稳定系数，依长细比 λ 与材料类型定)。贝雷梁连接节点抗剪切

强度验算用公式 $\tau = V/(nAv)$ 算剪切应力 (τ 为剪切应力, MPa; V 为剪力, N; n 为剪切面数量; Av 为单个剪切面面积, mm²), 确保 $\tau \leq [\tau]$ 。弯曲强度验算用公式 $\sigma = M/W$ 算弯曲应力 (σ 为弯曲应力, MPa; M 为弯矩, N·mm; W 为截面抵抗矩, mm³), 确保 $\sigma \leq [\sigma]$ 。

3.2 中心立柱的验算

中心立柱的强度验算根据受力状态 (轴心/偏心受压) 计算实际应力, (1) 轴心受压: 均匀竖向荷载且作用线与轴线重合时, 按 $\sigma = N/A \leq [\sigma_c]$ 验算 (σ 为压应力, MPa; N 为竖向轴力, N; A 为截面面积, mm²; $[\sigma_c]$ 为材料允许压应力, MPa)。(2) 偏心受压: 荷载不均或贝雷梁布置不对称时, 按 $\sigma_{max} = (N/A) + (M/W) \leq [\sigma_c]$ 验算最大压应力 (σ_{max} 为最大压应力, MPa; M 为弯矩, N·mm; W 为截面抵抗矩, mm³); 同时验算最小应力防开裂 (型钢立柱可允少量拉应力, 不超允许拉应力)。(3) 抗剪强度: 受水平荷载剪力时, 按 $\tau = V/Av \leq [\tau]$ 验算 (τ 为剪切应力, MPa; V 为剪力, N; Av 为抗剪切截面面积, mm²; $[\tau]$ 为材料允许剪切应力, MPa)。中心立柱的刚度验算验算水平荷载下水平变形, 确保不超允许值。按 $f_{max} = VI^3/(3EI)$ 算水平最大挠度 (f_{max} 为水平最大挠度, mm; V 为水平剪力, N; I 为柱高, mm; E 为弹性模量, MPa; I 为截面惯性矩, mm⁴), 确保 $f_{max} \leq [f]$ (允许水平挠度)。

重点验算竖向轴力与水平荷载下整体与局部稳定性, 防止出现屈曲失稳的情况, (1) 整体稳定性: 用欧拉或经验公式算临界压力, 结合稳定系数验算。轴心受压按 $N/(\varphi A) \leq [\sigma_c]$ 验算 (φ 为整体稳定系数, 依长细比 λ 与材料类型定); 偏心受压按 $N/(\varphi A) + M/(\gamma x W_{nx}) \leq [\sigma_c]$ 验算 (γx 为截面塑性发展系数; W_{nx} 为净截面抵抗矩, mm³)。长细比 $\lambda = l_0/i$ (l_0 为计算长度, mm, 依支撑条件定: 柱顶铰接、柱底刚接时 $l_0 = 0.7l$; 柱顶与柱底均刚接时 $l_0 = 0.5l$; 柱顶与柱底均铰接时 $l_0 = l$; i 为截面回转半径, mm)。(2) 局部稳定性: 型钢立柱 (如 H 型钢、钢管柱) 需验算翼缘板、腹板局部稳定性, 防局部屈曲。翼缘板按 $b/t \leq 13\sqrt{235/f_y}$ 验算 (b 为翼缘板宽度, mm; t 为厚度, mm; f_y 为屈服强度, MPa); 腹板按 $h_0/tw \leq 100\sqrt{235/f_y}$ 验算 (h_0 为腹板高度, mm; tw 为厚度, mm)。

3.3 节点连接整体验算

除贝雷梁节点和中心立柱柱底节点单独验算外, 还要开展节点连接整体验算, 验算各节点荷载传递能力, 确保承载力与传递荷载匹配。同时, 验算各节点变形能力, 确保与构件变形协调, 防节点变形大致构件相对位移。此外, 验算节点刚度, 确保足够刚度传递弯矩与剪力。可采用有

限元法, 建节点连接三维模型, 模拟荷载下节点受力与变形, 验算强度、刚度与稳定性。

3.4 地基基础的验算

地基承载力验算核心是保证地基土承载力能扛住中心立柱传递的竖、水平荷载, 按公式 $p \leq fa$ 验算 (p 为地基实际压应力, kPa; fa 为地基允许承载力, kPa), 其中 p 按 $p = N/A_f$ 计算 (N 为竖向轴力, N; A_f 为地基基础底面积, mm²)。地基沉降强度验算主要验算总沉降量与不均匀沉降量, 总沉降量 $s = s_1 + s_2$ (s 为总沉降量, mm; s_1 为瞬时沉降量, mm; s_2 为固结沉降量, mm), 瞬时沉降量用弹性力学公式验算, 固结沉降量用分层总和法验算。独立基础强度验算底板抗弯、抗剪、抗冲切强度。抗弯按 $M = (NI)/2 - (ql^3/8, \sigma = M/W \leq [\sigma])$ 验算; 抗剪按 $\tau = V/Av \leq [\tau]$ 验算; 抗冲切按 $\sigma_{\text{冲}} = F/lh \leq [\sigma_{\text{冲}}]$ 验算 (l 为底板长, mm; h 为底板厚, mm; $[\sigma_{\text{冲}}]$ 为允许抗冲切强度, MPa)。桩基础强度验算桩身与桩头强度。桩身按 $\sigma = N/A \leq [\sigma_c]$ 验算; 桩头验算方法与柱底节点强度验算方法相同。

4 结论

仓顶盖中心立柱搭配贝雷梁所构成的支撑体系, 其承受的荷载主要包括竖向荷载、水平荷载及温度应力, 贝雷梁主要承受来自竖向方向的弯曲作用、水平方向的弯曲作用以及局部位置的受力情况。中心立柱主要承受沿竖向的轴向作用力、水平方向的剪切作用力以及弯矩, 节点连接构件主要承受因结构传力特性而导致的局部受力。支撑体系的验算中需要重点验算贝雷梁、中心立柱、节点连接构件、地基基础强度、稳定性以及刚度, 与此同时在验算期间严格落实相关规范, 确保验算的精准性, 从而提高工程质量。

[参考文献]

- [1] 杨魁. 贝雷梁式钢栈桥设计施工技术 [J]. 黄河水利职业技术学院学报, 2020, 32(2): 17-20.
 - [2] 朱进军. 贝雷栈桥施工技术及验算 [J]. 交通建设与管理, 2015(8): 383-386.
 - [3] 陈璞. 基于增强型贝雷梁临时钢便桥的设计与受力分析 [J]. 四川水泥, 2025(1): 267-269.
 - [4] GB 50009—2012. 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
 - [5] GB 50017—2017. 钢结构设计标准 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- 作者简介: 刘小鹏 (1991.8—), 毕业院校: 山西大学, 所学专业: 建筑环境与设备工程, 当前就职单位: 中国五冶集团有限公司, 职务: 技术负责人, 职称级别: 工程师。