

大型体育建筑结构安全性检测与抗震性能评估技术及结构更新策略研究

李智品, 卓文辉

广东汇建检测鉴定有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2025年11月12日; 录用日期: 2025年12月3日; 发布日期: 2025年12月17日

摘要

近年来, 我国大量建于上世纪八九十年代的大型公共建筑逐渐进入结构性能退化期, 其安全性、耐久性及抗震性能问题日益突出, 尤其对于大型体育建筑而言, 结构复杂、使用频繁、荷载转换多样, 导致在长期服役后容易出现开裂、渗漏、锈蚀及刚度退化等现象。本文以大型体育建筑为研究对象, 系统梳理了结构检测与抗震性能评估的理论体系, 分析了抗震承载力不足的成因, 并提出适用于既有大型体育建筑的结构更新与加固策略, 研究内容涵盖结构检测技术体系、抗震性能鉴定、承载力复核分析与结构更新决策等关键环节。结果表明: 部分框架柱、梁、楼板及屋架构件的承载力、稳定性未能满足7度设防要求, 其抗震安全裕度显著下降, 并且提出结构更新策略, 即混凝土构件裂缝灌浆、碳纤维布加固、钢板加固、构造细部补强、防腐涂层修复、屋盖支座更新及结构健康监测系统建设, 最后结构更新决策采用多目标优化模型, 兼顾承载力恢复、耐久性延寿与经济性。本研究成果可为城市范围内既有体育建筑群的结构寿命延伸与抗震性能增强提供可借鉴的技术路径和决策依据。

关键词

大型体育建筑, 结构检测, 抗震性能评估, 加固更新

Research on Structural Safety Inspection, Seismic Performance Evaluation Technology and Structural Renewal Strategies for Large-Scale Sports Buildings

Zhipin Li, Wenhui Zhuo

Guangdong Huijian Testing and Appraisal Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: November 12, 2025; accepted: December 3, 2025; published: December 17, 2025

Abstract

In recent years, a large number of large-scale public buildings constructed in China in the 1980s and 1990s have gradually entered the period of structural performance degradation. Their issues regarding safety, durability, and seismic performance have become increasingly prominent. Especially for large-scale sports buildings, the complex structure, frequent use, and diverse load conversion lead to phenomena such as cracking, leakage, corrosion, and stiffness degradation after long-term service. Taking large-scale sports buildings as the research object, this paper systematically sorts out the theoretical system of structural inspection and seismic performance evaluation, analyzes the causes of insufficient seismic bearing capacity, and proposes structural renewal and reinforcement strategies suitable for existing large-scale sports buildings. The research content covers key links such as the structural inspection technology system, seismic performance appraisal, bearing capacity review and analysis, and structural renewal decision-making. The results show that the bearing capacity and stability of some frame columns, beams, floor slabs, and roof structure components fail to meet the seismic fortification requirements of intensity 7, and their seismic safety margin has significantly decreased. Corresponding structural renewal strategies are proposed, namely concrete component crack grouting, carbon fiber sheet reinforcement, steel plate reinforcement, structural detail strengthening, anti-corrosion coating repair, roof support renewal, and the construction of a structural health monitoring system. Finally, a multi-objective optimization model is adopted for structural renewal decision-making, taking into account bearing capacity recovery, durability extension, and economy. The research results can provide a reference technical path and decision-making basis for extending the structural service life and enhancing the seismic performance of existing sports building groups in cities.

Keywords

Large-Scale Sports Buildings, Structural Inspection, Seismic Performance Evaluation, Strengthening and Renewal

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着我国城市化进程的持续推进,大量建于20世纪80~90年代的大型公共建筑逐渐进入结构服役后期,这一时期建造的体育场馆、会展中心、剧院等大型空间结构建筑[1],然而,随着设计理念的更新和建筑规范的修订,这些建筑的抗震设计水平与当代标准之间已存在显著差距[2]。尤其是体育建筑,其结构体系复杂、构件数量庞大、荷载组合多样,服役环境恶劣,长期受到气候侵蚀与荷载反复作用,导致结构材料性能退化、节点连接松弛及整体刚度下降等现象频繁出现[3]~[5]。并且在地震作用下,大跨度体育建筑的受力特征显著不同于常规多层建筑,其结构体系往往具有高柔度、低阻尼及复杂的动力耦合特性,一旦关键节点或受力构件发生屈曲,将可能引发体系级的渐进性破坏[6]。此外,随着城市公共空间功能需求的持续升级,体育建筑逐渐承担复合型社会功能,如文体活动、灾害避难及大型集会等,其结构安全的重要性更为突出[7]~[8]。因此,系统开展既有大型体育建筑的结构检测与抗震性能评估,并且构建科学的检测-评估-加固-监测技术体系,已成为结构工程学科亟待解决的关键问题。

国外在既有建筑抗震性能评估与加固方面起步较早, 形成了较为完善的理论体系与技术标准[9][10]。美国联邦应急管理局首次提出基于性能的抗震设计概念, 并通过性能目标分级实现结构抗震能力的定量控制[11][12]。日本自1995年阪神大地震后全面推行建筑耐震评估与改造制度, 形成了现状性能系数法, 通过综合考虑材料退化、节点连接和构造细节因素确定建筑的抗震能力指数, 并以经验公式与地震危险度曲线进行对应, 实现快速判定[13]。欧洲标准则强调结构延性、能量耗散与非线性响应控制, 对大跨钢结构与空间网架体系提出了变形控制的性能准则。此外, 国外研究普遍注重结构全寿命周期管理理念[14], 例如, 美国加州大学伯克利分校提出了“地震-损伤-更新”耦合模型, 将地震响应分析、损伤识别与加固策略优化纳入同一体系, 实现基于可靠性的更新决策。

我国对既有建筑抗震性能的研究始于20世纪90年代, 《建筑抗震鉴定标准》和《民用建筑可靠性鉴定标准》的颁布, 标志着抗震鉴定体系的基本形成。近年来, 国内学者在结构性能退化机理、抗震评估方法及加固技术方面取得了系列成果。在抗震评估方法方面, 国内学者提出了基于承载力比值的构件性能评定法、基于变形能力的塑性层次分析法以及概率统计法等[5][15]。由此可见, 现阶段检测数据多停留在报告层面, 未形成面向性能评估的动态数据库, 抗震性能评估结果尚未与更新决策过程建立量化关联[16], 加固方案的选择往往依赖经验, 缺乏基于长期监测数据的性能退化规律研究, 难以支撑“韧性更新”目标下的全寿命周期设计[17]。

因此, 本文以广州天河体育中心体育馆为研究对象, 通过现场检测、构件取样与实验, 掌握结构关键构件的材料性能、构造细部、损伤状态等安全性能; 其次并基于现行规范, 进行结构抗震性能分析; 最后, 识别影响该体育馆抗震性能的关键薄弱环节, 提出针对性的结构更新策略, 形成检测-评估-加固-监测闭环管理体系。本文的研究为后续城市存量体育建筑群的结构延寿与抗震韧性提升提供参考。

2. 工程概况与检测条件

2.1. 工程概况

本研究选取广州天河体育中心体育馆作为典型研究对象(图1)。该场馆位于广东省广州市天河区, 是城市核心区内一座具有代表性的大型公共体育建筑群成员。该建筑主体建于1987年, 并于其后多年投入大型赛事及日常运营。根据公开资料, 本场馆隶属于天河体育中心体育场群, 该场馆群建设用地超过50万m²。在结构体系方面, 本场馆采用钢筋混凝土框架结构与屋面组合钢结构相结合的方案。建筑高度约36m, 屋盖最大跨达到约80m, 以满足观众看台及赛事场地的功能需求。该结构在设计时抗震设防烈度为7度, 场地类别为II类, 原结构材料以C25混凝土及Q235普通钢材为主, 钢筋等级包括I级与II级钢。长期处于南方湿热气候、高人流聚集、赛事频繁使用状态, 且维护周期跨度较长, 部分区域已出现渗水、裂缝扩展、钢筋锈蚀等耐久性问题。



Figure 1. On-site photo of Guangzhou Tianhe Sports Center Gymnasium
图1. 广州天河体育中心体育馆现场图

对广州天河体育中心体育馆进行现场勘测(图 2), 初步病害调查表明: 1) 混凝土保护层剥落、钢筋外露、白色晶体析出; 2) 钢结构屋架涂层严重老化、局部剥落、支座锈蚀; 3) 屋面排水系统老化不畅、积水现象明显, 导致部分构件锈蚀加速; 4) 某些柱、梁构件的承载能力经抽样检测发现低于规范限值。



Figure 2. On-site survey drawing, (a) Cracking, water seepage and yellowing; (b) Spalling of protective layer and corrosion of steel bars in concrete slabs

图 2. 现场勘测图, (a) 混凝土柱开裂、渗水泛黄; (b) 混凝土板保护层剥落、钢筋锈蚀

上述情况表明, 本场馆的抗震性能存在退化迹象, 亟需开展系统的结构检测与抗震性能评估, 鉴于其结构形式、建造年代、使用强度及功能属性, 该场馆具备典型性, 可为我国 20 世纪 80~90 年代建成的大型体育公共建筑提供经验参考。

2.2. 结构体系特征

本场馆结构体系具有以下典型特征: 1) 屋盖采用钢结构支撑于混凝土框架柱顶部, 其跨径约为 80 m, 属于少柱大跨结构体系。在地震作用下, 大跨度构件的高柔度、低阻尼以及众多节点连接的特性, 使其更容易出现屈曲、连接失效、振型耦合与动力放大效应。2) 本场馆将传统的钢筋混凝土框架与钢结构屋盖组合, 框架结构承担垂直荷载与部分水平荷载, 而屋盖结构承担大跨覆盖荷载及屋面环境荷载。3) 除了基本的恒载与活载外, 该场馆还承担水体荷载、设备荷载、风荷载等多种作用形式, 在抗震评估中, 需综合考虑这些混合作用及其对结构反应的影响。4) 屋盖结构中桁架、网架与钢-混凝土混合节点、支座系统、悬挂系统、看台悬臂端连接等, 均为结构薄弱环节。5) 本场馆已服役逾 30 年, 长期处于南方湿热气候、人流频繁、赛事更换快、有少维修或改造历史。结构材料经年累月暴露于碳化、氯离子侵入、钢筋锈蚀、保护层剥落、构件裂缝扩展以及涂层老化等作用之下, 导致耐久性下降、刚度退化、疲劳累积、节点螺栓松弛等问题。

2.3. 建筑抗震检测流程

基于《建筑抗震鉴定标准》和《建筑抗震设计规范》, 对结构布置、构造细部、材料强度、节点连接等进行核查。核查项目包括: 平面及立面规则性、防震缝布置情况、框架柱净高与截面比、柱纵向配筋率、柱端箍筋加密区尺寸、梁端箍筋间距、填充墙嵌入与拉结筋布置等, 若防震缝缺失、构造箍筋加密区不满足规范要求, 则视为构造措施不达标。本研究检测流程设计如下:

- 1) 宏观调查阶段: 通过现场巡查、拍照记录、裂缝宽度计测量、钢筋外露记录、锈蚀痕迹采集、构

件变形测量等方式, 识别结构已出现的病害类型、损伤范围、分布特点。

2) 构件检测阶段: 针对抽样构件开展混凝土钻芯强度检测、回弹法检测、钢筋锈蚀电位测试、涂层测厚、超声波测厚、裂缝图像识别、钢结构硬度测试等。数据整理归档并关联构件位置、服务年限、环境状态。

3) 数据整理与预处理: 将检测数据录入结构健康数据库, 包括构件编号、检测类型、检测值、检测环境、历史维修情况等; 对异常数据进行核查与复测。

4) 数值模型与抗震分析: 基于检测结果修正结构有限元模型(采用 YJK 或同类软件), 考虑材料退化、构件损伤、连接松弛等因素, 进行承载力验算、变形验算、自振周期分析、长细比检核、稳定性检核等。

5) 综合评估阶段: 依据《民用建筑可靠性鉴定标准》及《建筑抗震鉴定标准》, 对地基基础、上部承重结构、围护结构分别进行安全性等级判定, 并结合抗震性能分析结果判定抗震能力等级。

6) 结构更新建议制定: 基于检测与评估结果, 提出适用于本场馆的加固与修复方案, 包括混凝土构件裂缝灌浆、碳纤维布加固、钢结构防腐涂层更新、屋盖网架支座加强、结构监测系统布设等建议, 并构建监测反馈机制以支持后续结构寿命管理。

3. 结构安全性分析

在本次鉴定过程中, 对于主体结构的承载能力、安全性状态以及未来监测维护需求进行了系统性复核。首先, 结构验算所依据的参数取值必须严谨、合理, 并能够反映建筑物现状及其后续使用条件。鉴于该体育馆建成年代较早、服役年限已长, 因此本次模型计算既使用了 3D3S 软件进行整体结构模拟分析, 也严格以现场检测实测数据为基准, 采用实测构件截面尺寸、材料强度指标、荷载组合、场地类别等参数, 从而最大限度地贴近实际结构状态。验算所采用的基本信息包括设防烈度为 7 度第一组、场地类别II类、地面粗糙度 B 类; 荷载参数中恒荷载取楼面 1.5/2.5 kN/m²、屋面 1.2 kN/m², 活荷载取楼面 2.5/3.5 kN/m²、楼梯 3.5 kN/m²、卫生间 2.5 kN/m²、屋面 0.5 kN/m², 并引入基本风压 0.50 kN/m²。材料强度计算取值方面, 混凝土强度 C25 贯穿各主要楼层, 钢筋强度I级 240 N/mm², II级 340 N/mm², 钢材采用 Q235。为保证计算反映结构服役现状, 对于实测低于上述取值的构件, 采用实测数据进行验算; 同时, 为考虑后续使用年限的变化影响, 荷载调整系数取 0.93。

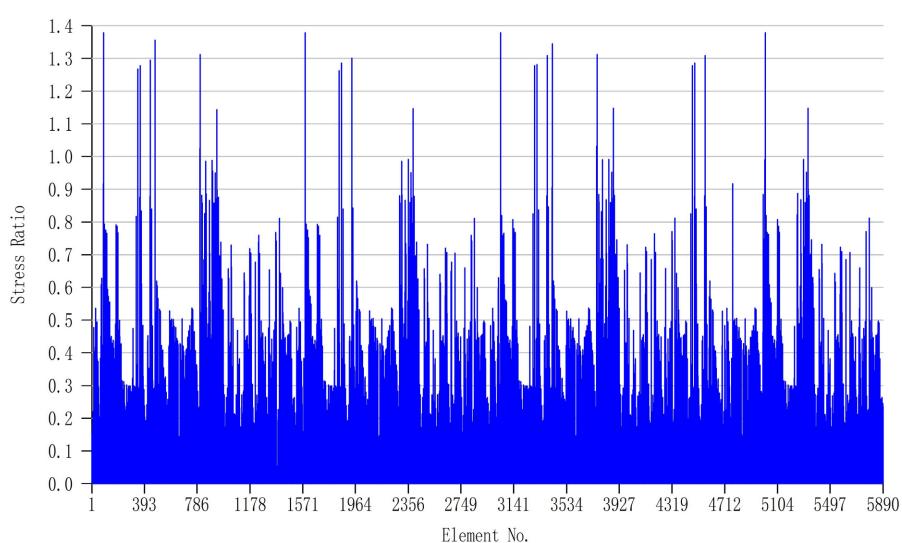


Figure 3. Stress ratio distribution diagram of the model

图 3. 模型应力比分布图

在框架柱承载力验算阶段, 依据现场检测结果, 对抽检柱件配筋情况、箍筋配置、截面尺寸、混凝土强度等参数进行了校核(图3)。结果显示: 建筑外围附属结构的若干框架柱承载力明显不能满足验算要求, 而主体结构中的网架支柱大体上满足安全验算条件。具体可言, 部分构件表现良好, 安全性评级为 a_u 或 b_u ; 但亦有少数构件实配值与验算值接近甚至低于验算要求, 其安全性评级为 d_u , 构件集安全性评级亦为 d_u , 抽样验算结果如表1所示。该结果表明, 尽管结构体系尚保有一定承载能力, 但受配筋、保护层剥落、环境侵蚀、材龄老化等因素影响, 一些关键柱构件的承载力已偏低, 存在显著的安全隐患。与此同时, 依据《民用建筑可靠性鉴定标准》中对于子单元安全性等级判定的分类原则, 当子单元安全性等级为 C_u 级时, 应采取相应加固措施。

Table 1. Reinforcement checking calculation results of representative frame columns
表 1. 代表性框架柱配筋验算结果

楼层	构件位置	构件配筋情况						构件安全性评级
		短边纵筋(mm^2)		长边纵筋(mm^2)		箍筋(mm^2/m)		
		实配值	验算值	实配值	验算值	实配值	验算值	
负一层	13 × R	2454	1000	1786	1300	1038	600	满足 a_u
负一层	19 × D	760	400	760	400	226	600	满足 b_u
首层	3 × E	509	300	509	300	226	600	满足 b_u
首层	3 × F	509	300	509	300	228	600	满足 b_u
二层	10 × D	7854	5200	4909	5200	6786	600	不满足 c_u
二层	13 × E	2122	1000	2945	1000	4806	600	满足 a_u
三层	1/3 × H	1963	600	1473	700	612	600	满足 a_u
夹层	8 × B	804	600	402	473	230	600	不满足 d_u
夹层	10 × B	804	400	402	300	228	600	满足 b_u

接着, 在梁构件承载力验算中, 对抽样梁跨中底筋与箍筋情况进行了系统校核(表2)。验算结果指出: 外围建筑某些框架梁尚不能满足结构安全验算要求。具体来看, 部分梁构件的安全性评级为 d_u 。此类梁构件承载能力不足, 意味着在地震、偶然荷载或其他极端作用下, 其发生破坏或失效的风险较高, 鉴于梁构件在框架结构中对整体刚度与延性起关键作用, 其劣化状态将直接影响整体结构的抗震性能与变形能力。

Table 2. Reinforcement checking calculation results of representative beams
表 2. 代表性梁配筋验算结果

楼层	构件位置	构件配筋情况				构件安全性评级
		跨中底筋(mm^2)		箍筋(mm^2/m)		
		实配值	验算值	实配值	验算值	
首层	10 × R~T	8836	4500	2096	1300	满足 a_u
首层	18~19 × R	308	387	500	200	不满足 d_u
二层	4 × D~E	2233	1000	766	400	满足 a_u
二层	3~4 × F	2971	1100	510	400	满足 a_u
三层	8 × D~E	3217	1500	1604	600	满足 a_u
三层	12 × 0/P~Q	2945	3700	1532	1200	不满足 d_u

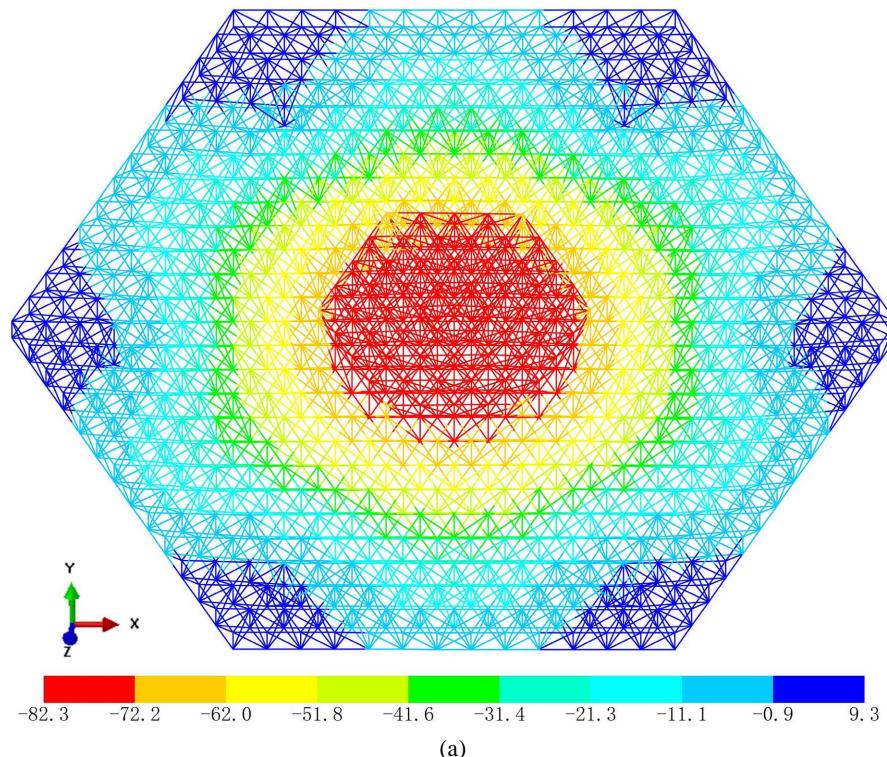
在楼板承载力验算方面, 依据现场检测取得的配筋数据、钢筋间距、板厚、板面裂缝情况等, 验算结果显示外围建筑部分楼板安全性不满足验算要求(表3), 相当一部分其配筋实配值远低于验算值, 其安

全性评级下降至 d_u 。楼板作为承载活荷载、游客荷载与机电设备荷载的重要构件, 其不满足承载力要求直接威胁场馆运行安全, 考虑到体育场馆使用性质特殊, 应在加固方案中优先考虑楼板强化、局部补强及再检测验证的重要性。

Table 3. Reinforcement checking calculation results of representative floor slabs
表 3. 代表性楼板配筋验算结果

楼层	构件位置	构件配筋情况(mm^2/m)				构件 是否满足要求	构件 安全性能 评级		
		短向		长向					
		实配值	验算值	实配值	验算值				
首层	19~20 × R~T	457	285	184	150	满足	a _u		
首层	2~3 × R~T	451	285	187	150	满足	a _u		
二层	2~1/3 × L~M	600	278	186	150	满足	a _u		
二层	2~1/3 × L~M	326	225	184	150	满足	a _u		
三层	8~9 × B~C	185	136	112	120	基本满足	b _u		
三层	10~12 × S~T	188	150	112	150	不满足	b _u		
三层	2~1/3 × L~M	262	150	113	150	不满足	b _u		

此外, 本次鉴定还对屋架结构进行了承载力校核, 重点针对屋面组合网架构件的强度应力比、稳定应力比及长细比进行了分析, 如图 4 所示。验算结果表明: 虽长细比基本满足规范要求, 但强度应力比与稳定应力比普遍未满足安全验算要求。结果形成了明确警示: 屋盖网架作为大跨结构的重要部位, 其失效将引发严重的体系安全风险, 应优先纳入加固范围。结合现场检测中屋架杆件壁厚减薄、涂层剥落、节点锈蚀等实况, 推荐采用加强节点连接、钢管壁加固、防腐涂层恢复、滑动支座检查、更换及防水排水系统优化等多项措施。



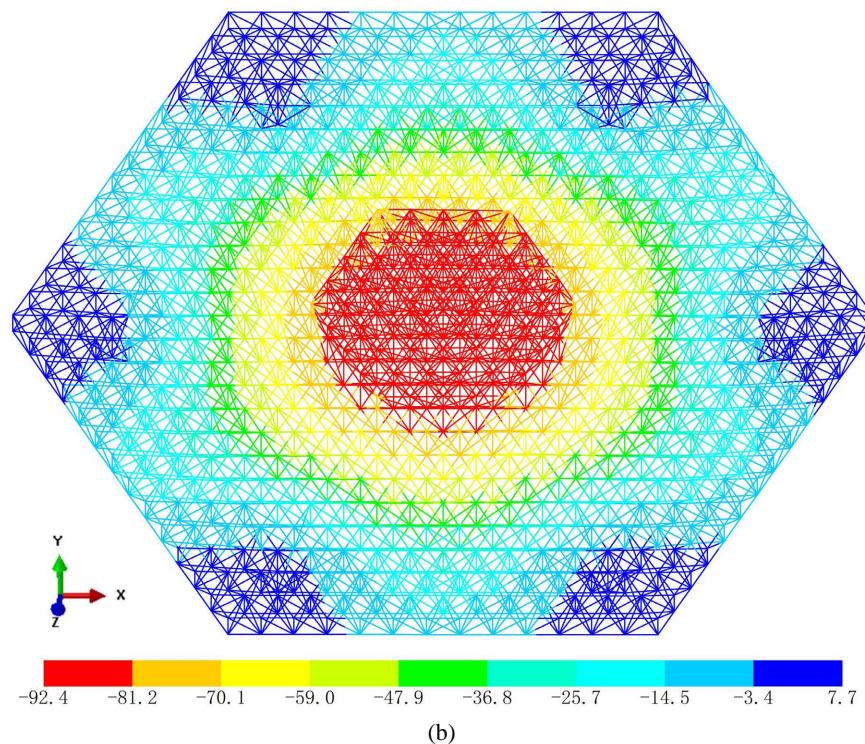


Figure 4. Combined displacement diagram of the gymnasium, (a) Maximum positive displacement combination; (b) Maximum negative displacement combination

图 4. 体育馆组合位移图, (a) 最大正位移组合; (b) 最大负位移组合

综上所述, 通过上述各类构件的验算分析可知, 该体育馆结构整体尚具有一定承载能力, 但存在多个关键构件承载力不足、耐久性损伤严重、抗震安全裕度降低的状况。根据《GB50068-2018》对既有结构可靠性设计标准的要求, 对于结构服役年限、耐久性状态、荷载历史变更、材料性能衰减等因素应综合考虑。鉴定结论明确指出, 若要维持建筑物安全运营且满足抗震设防要求, 必须对不满足验算要求的柱、梁、板、屋架等构件实施加固或更换, 并建立长期结构健康监测体系, 以形成“检测-评估-加固-监测”闭环管理机制。

4. 抗震性能分析

4.1. 结构布置与构造措施鉴定

根据《建筑抗震鉴定标准》GB50023-2009, 将其归属于 A 类建筑, 即其后续设计使用年限不超过 30 年的既有建筑, 故在抗震鉴定中应至少满足其原设计使用规范的抗震要求。首先, 在结构体系布置方面, 依据 TJ11-78 及 GB50023-2009 的相关条款, 结构应具备平面与立面上的对称性、质量及刚度分布均匀、避免出现明显的形状突变或刚度突变区。经现场核查, 该体育馆体型规则、主承重框架分布合理、屋盖大跨网架体系对称性较好, 防震缝设置合理, 整体布置满足规范要求。其次, 防震缝布置方面, 考虑到大跨体育馆屋盖体系与框架体系之间刚度差异较大, 规范建议当结构形状复杂、刚度差异显著时, 应在平、立面布置防震缝, 并保证缝两侧为框架结构。现场测量防震缝宽度为约 110 mm, 且两侧结构形式均为框架体系, 故该项判定符合要求。第三, 材料强度等级及构造尺寸方面, 依据 TJ11-78, 框架混凝土标号不宜低于 C20, 现场检测混凝土强度标号 ≥ 200 号, 且框架柱净高均大于其截面长边 4 倍的要求, 因此该项也符合规范要求。不过, 在柱配筋及构造细部方面仍存在不足: 如柱纵向钢筋配筋率测定值低于

规范要求的不小于 0.6% 的最低值, 部分构件实际配筋率未达到规定要求; 再如柱端箍筋最大间距要求不大于 100 mm, 但部分构件加密区内箍筋间距仍大于 100 mm。此外, 填充墙与框架柱、梁之间拉结筋未设置, 导致剪力传递与整体协同刚度降低。综合来看, 尽管结构布置总体合理, 但构造措施未完全满足 TJ11-78 要求, 从而在第一等级鉴定中判定该建筑部分抗震措施不符合规范要求。

4.2. 抗震承载力验算

在完成第一级构造核查后, 为进一步评定建筑结构在地震作用下的整体抗震性能, 本研究依托两种主流结构分析软件构建三维模型, 结合现场检测的构件截面尺寸、材料性能、荷载状态和使用年限, 开展抗震承载力验算, 这一阶段严格依据 GB50023-2009 中关于抗震承载力计算的条款要求。

图 5 为构件应力比分布图, 结果显示, 尽管多数构件跨中底筋与箍筋配备满足验算值要求, 但部分梁配筋或箍筋实配值低于验算值, 判定结果为不满足。楼板抽样验算结果亦显示, 外围结构部分楼板配筋严重偏少, 多数判定不满足结构安全验算要求。作为大跨度体育馆的重要承载部件, 梁板承担复杂荷载, 其抗震承载力不足直接影响整体结构震后变形与能量耗散能力。

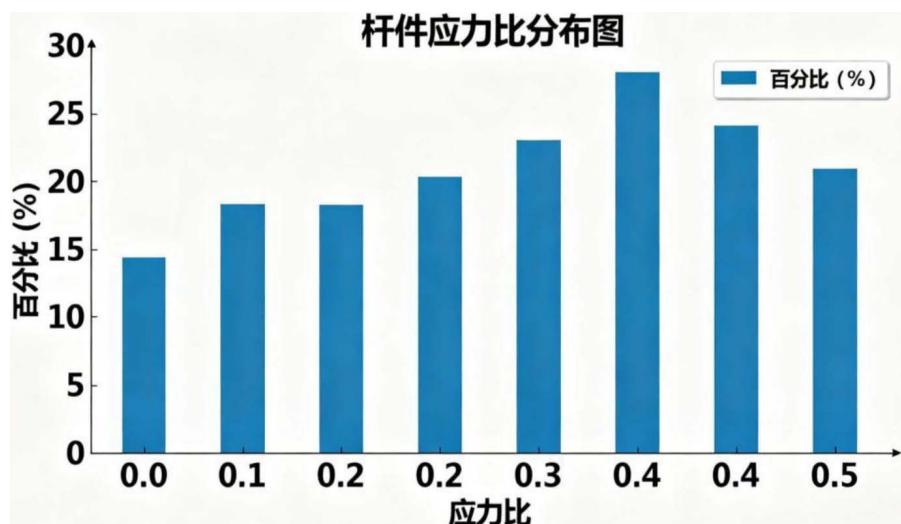


Figure 5. Stress ratio distribution diagram of structural members

图 5. 构件应力比分布图

对于屋面组合网架体系在本结构中属于承重关键部位, 本次验算重点分析其强度应力比、稳定应力比、长细比指标。验算结果显示: 虽然强度应力比分布中部分构件满足要求, 如图 6 所示, 但稳定验算中多数单元的稳定应力比、长细比指标超限, 判定为不满足。这表明屋盖网架的整体稳定性存在薄弱, 屋盖失稳在大型体育建筑中属于高风险破坏模式, 一旦发生将导致体系性破坏。

由此可见, 针对构造措施不足与承载力退化的因果关系, 检测与验算结果显示: 防震缝缺失、柱端箍筋加密区不足、屋面网架构件长细比偏高等构造问题与构件承载力不足、稳定性降低呈正相关。对于耐久性退化对抗震性能的影响, 钢筋锈蚀、混凝土碳化、保护层剥落等耐久性损伤使得构件截面有效面积、配筋率及黏结性能降低, 导致构件变形能力与抗震能耗显著下降。如钢筋锈蚀使得箍筋约束效应减弱, 削弱柱端延性能力。并且, 屋盖网架体系因其跨度大、节点多、构造复杂, 而且受损后维修难度大, 成为全结构抗震体系中的瓶颈环节。此外, 自振周期偏长说明结构刚度退化, 代表在地震作用下结构变形需求更大、耗能能力更低, 结合可靠性分析, 可判定结构处于安全裕度下降阶段。

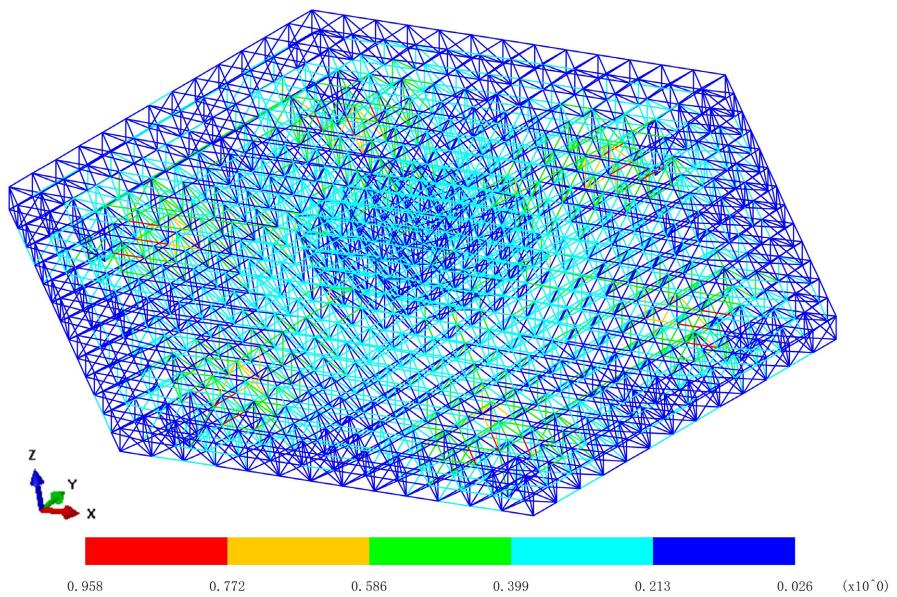


Figure 6. Strength stress ratio distribution diagram of structural members

图 6. 构件强度应力比分布图

5. 结构更新策略

5.1. 更新需求识别

基于上述对广州天河体育中心体育馆的检测与抗震性能分析结果可知, 结构安全性不足的控制因素主要可从构件受力特性、几何参数及荷载路径三个层面进行分析。整体而言, 混凝土框架构件虽然整体强度尚可, 但耐久性损伤较为严重; 钢结构屋盖体系为系统薄弱环节, 其承载力验算、稳定性验算指标均已超出规范要求范围; 构造措施部分项不符合早期规范要求, 影响抗震延性与耗能能力; 整体结构自振周期偏长, 刚度退化严重, 可靠度指标下降。因此, 对于典型柱类构件, 其承载力不足主要源于较高的轴压比和长细比, 根据《钢结构设计规范》, 稳定系数随长细比增大呈指数降低, 意味着高耸柱构件在轴压和初弯曲共同作用下, 其失稳风险显著增大; 其次, 梁类构件承载力不足主要由跨中弯矩峰值引起, 《钢结构设计规范》中指出梁的承载性能受截面惯性矩和有效高度控制; 再者, 对于屋架结构, 拉压杆件的受力安全性明显受长细比影响。杆件的较大时, 初弯曲放大效应显著, 进而降低稳定系数。基于以上识别, 可明确此次更新的两大主要目标: (1) 抗震能力恢复与提升; (2) 结构耐久性修复与寿命延长。在这两大目标之下, 应从承载力、延性、耗能、耐久性、使用功能及经济性多个维度确定更新策略。

5.2. 加固与修复措施

针对柱、梁构件中存在的保护层剥落、钢筋锈蚀、承载力边界不足的问题, 本研究建议如下措施: 1) 碳纤维增强复合材料加固: 对于裂缝扩展、钢筋锈蚀需要恢复承载力的柱、梁, 可采用外包碳纤维布或板进行包裹加固, 该方法具有高强度、施工便利、耐久性好等优点。2) 钢板/粘钢加固: 对于承载力严重不足或截面尺寸难以改变的构件, 可采用粘贴钢板或外包钢构件进行加固, 以提升轴力、剪力与弯矩承载力。3) 箍筋加密与柱端加固: 对于柱端箍筋间距过大、延性不足的问题, 应在柱端区域进行箍筋加密、外包钢筋笼或灌浆加固, 增强约束效应并提升延性能力。4) 裂缝灌浆修复与表面防护: 对于轻微裂缝、渗水晶体析出部位, 应先进行裂缝灌浆封闭, 然后对保护层剥落区域回补高强水泥砂浆并刷防腐漆, 以恢复构件耐久性。

因此, 基于构造措施核查结果, 建议实施以下补强措施: 1) 设置防震缝或改善结构刚度突变: 对于未布置防震缝且平面或立面存在刚度或质量突变的体系, 应考虑增设防震缝或加设减震/隔震装置, 以改善整体抗震性能。2) 优化构造箍筋加密区: 对于柱端箍筋加密区间距大于规范要求的情况, 应增加外筒加固或采用外包箍筋形式提高约束效应, 从而提升柱端延性。3) 填充墙与框架拉结筋完善: 对于填充墙与框架结合不良处, 应补设拉结筋, 并对墙体裂缝处进行灌浆修复、钢丝网批荡、重新装饰恢复, 以保证墙体与框架传力及整体结构完整性。4) 支座加固与楼板连接加强: 对悬臂看台、楼板与梁连接、锈蚀支座等薄弱细部, 应进行支座补强、更换或改造连接节点, 提高结构连续性与整体抗震能力。

5.3. 多目标优化决策模型构建

在结构更新中, 仅提升抗震承载力不足以满足工程实际需求, 还必须兼顾成本、使用中断、施工风险、耐久性提升等多重目标。因此, 本研究提出以下多目标优化决策模型:

$$\min J = w_1 \cdot C + w_2 \cdot T + w_3 \cdot D - W_4 \cdot S \quad (1)$$

其中: C 为加固成本; T 为施工干扰/中断时间; D 为预计寿命延长年限; S 为抗震性能提升幅度; w_i 为各目标权重。

通过采用层次分析法或模糊综合评判法, 可以对不同加固方案进行评分、排序并选择最优方案, 类似研究表明, 多方案对比优化是既有建筑改造的重要趋势。

针对该体育馆结构更新应制定明确的实施路径及阶段控制计划, 包括以下关键节点: 1) 方案设计阶段: 基于检测结果提出多个加固方案, 开展结构分析、施工可行性评估、成本-收益分析以及风险分析。2) 施工准备阶段: 细化施工图、取得资质单位、制定监测与施工安全方案、预先设立健康监测系统。3) 施工实施阶段: 推荐分区、分阶段施工, 避免大面积停馆。先实施关键承载结构加固(如屋盖节点、柱梁加固), 后实施附属构件耐久性修复(如墙体、涂层、支座)。4) 验收与监测阶段: 施工后进行复测(混凝土强度、钢构件壁厚、节点刚度、自振周期等)。同时启动结构健康监测系统, 对位移、应力、裂缝扩展、锈蚀发展等进行长期跟踪。5) 运维与寿命管理阶段: 结合监测反馈结果, 定期评估结构状态、修订维修计划, 为结构安全与延寿提供数据支持。

6. 总结

本文针对我国典型 20 世纪 80~90 年代建设的大型体育建筑, 以广州天河体育中心体育馆为研究对象, 从工程概况、检测条件、结构安全性分析、抗震性能鉴定及更新策略等方面展开。主要结论如下:

- 1) 在结构安全性分析中, 通过现场检测、构件抽样及数值模型验算, 指出框架柱、梁、楼板及屋盖网架体系中关键承载构件存在配筋率不足、箍筋加密不达标、稳定性差、长细比偏高等问题, 导致抗震安全裕度降低。
- 2) 依据《建筑抗震鉴定标准》的验算流程对该体育馆进行抗震性能评估, 确认该体育馆虽结构布置合理、防震缝设置合规, 但构造细部配筋及节点连接未完全满足规范要求; 承载力验算结果表明, 其整体抗震能力尚未满足 7 度设防条件。
- 3) 在结构更新策略中, 文章提出以“承载力恢复、耐久性提升、经济合理”为导向的多目标优化模型, 并针对薄弱构件制定碳纤维布加固、粉刷防腐修复、屋盖节点加强、结构健康监测系统建设等具体措施, 同时规划分区分阶段施工与监测反馈机制。

总体而言, 本研究不仅对该典型体育馆的抗震状况与结构健康状态作出了量化评估, 也为类似年代、结构形式的大型体育建筑提出了系统化、可操作的结构更新路径, 对提升公共体育基础设施的韧性与安全具有重要工程与学术价值。

参考文献

- [1] 朱鸿鹏. 建筑结构检测及安全性评价探析[J]. 建材发展导向, 2025, 23(3): 7-9.
- [2] 吴泽隆. 广州某厂房结构安全性及抗震检测鉴定与分析[J]. 中国建筑金属结构, 2025, 24(2): 116-118.
- [3] Sabu, D.J. and Pajgade, P.S. (2012) Seismic Evaluation of Existing Reinforced Concrete Building. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, **3**, 1-8.
- [4] 史铁花, 王翠坤, 郭浩, 等. 基于普查的既有建筑抗震隐患评价技术研究[J]. 建筑结构, 2024, 1-8.
- [5] 沈利伟. 既有大型复杂建筑主体结构安全性检测与鉴定技术——以嘉兴湘家荡绿地铂瑞酒店为例[J]. 建筑安全, 2022, 37(1): 36-41.
- [6] Pirizadeh, M., Saber Nikoopasand, F. and Badarloo, B. (2021) Performance Evaluation and Seismic Risk Assessment of Stadium Structures (Case Study: A Roofless Football Stadium). *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**, 182-194.
- [7] Jia, L., Sun, C., Lv, W. and Li, W. (2024) Research on Safety Evaluation of Stadium Reconstruction Construction Based on Combination Weighting Extension Model. *Applied Sciences*, **14**, Article 9575. <https://doi.org/10.3390/app14209575>
- [8] 张先建, 郭军伟. 建筑结构检测及安全性评价[J]. 江西建材, 2025(6): 131-134.
- [9] Sobaih, M., Soliman, M.M. and Elnashai, A.S. (1992) Seismic Vulnerability Evaluation of Existing Reinforced Concrete Buildings. *Proceedings of International Symposium on Earthquakes and Ways of Protection*, Aleppo, 19-24 July 1992, 21-23.
- [10] Mohamed, M.A.A. and Elfadle, H.E.A. (2013) Transformable Architecture, a Key to Improve Stadiums & Sports Buildings. *The First International Engineering Conference Hosting Major International Events Innovation, Creativity and Impact Assessment*, Cairo, 24-26 June 2013, 15-18.
- [11] 冉俣, 黄选明, 卢宇飞, 等. 美国既有建筑抗震鉴定评估标准体系演进及与中国对比[J]. 工业建筑, 2025: 1-10.
- [12] 陈庆, 史铁花. 中美日抗震鉴定标准对比分析[J]. 建筑结构, 2025, 55(8): 33-42.
- [13] Okada, T. (2021) Development and Present Status of Seismic Evaluation and Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings in Japan. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, **97**, 402-422. <https://doi.org/10.2183/pjab.97.021>
- [14] Piscal-Arévalo, C.M., Villalba-Morales, J.D., Hurtado, X., Ángel-Giraldo, D.C. and Rincón-Chuscano, C.A. (2023) Structural Behavior of a Seismic-Isolated Stadium Grandstand Considering Hard and Soft Soil Conditions. *Dyna*, **90**, 58-65. <https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.105469>
- [15] 陈锦. 既有建筑抗震鉴定地震影响系数的取值探究[J]. 福建建筑, 2023(1): 43-46.
- [16] 余全俊. 可持续发展视域下建筑设计在城市更新项目中的机遇探究[J]. 居舍, 2025(29): 125-128.
- [17] 周灿培. 城市更新背景下既有建筑结构安全性检测技术优化——以某市老城区红星小区 5 号楼为例[J]. 城市建设, 2025(23): 87-89.