海南省美术馆复杂异形清水混凝土结构设计与分析

戴嘉琦　许晓梁*　姚树典
（同济大学建筑设计研究院（集团）有限公司，上海 200092）

摘　要　针对高烈度区异形清水混凝土结构设计方法匮乏、建筑美学与抗震性能难以协同、立面完整性与装配式结构构造需求矛盾突出的问题，本文以地处8度半高烈度设防区的海南省美术馆项目为依托，开展复杂异形清水混凝土结构设计与抗震性能研究，将清水混凝土工艺应用于装配式结构，实现建筑清水效果与装配式建造要求的协同。项目采用钢筋混凝土剪力墙结构体系，针对结构多项不规则特征建立分水准、分构件的抗震性能化设计方法，采用“三缝合一”裂缝控制技术，研发嵌入式钢梁节点、建筑结构保温一体化构造、复杂曲面屋盖逆吊法参数化找形专项技术，解决了墙体裂缝防控、钢梁-剪力墙面外连接可靠性、异形立面节能与结构协同、建筑形态与受力性能匹配的工程难题。本研究构建了高烈度区异形清水混凝土建筑-结构一体化设计体系，可为同类清水混凝土结构设计、装配式应用与抗震控制提供工程参考。

关键词　高烈度设防区，异形清水混凝土结构，装配式，抗震性能，建筑-结构一体化设计
中图分类号：TU29　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.15935/j.cnki.jggcs.202604.0023

Design and Analysis of Complex Irregular Fair-Faced Concrete Structure for Hainan Art Museum

DAI Jiaqi　XU Xiaoliang*　YAO Shudian
（Tongji Architectural Design（Group）Co.,Ltd., Shanghai 200092, China）

Abstract　To address the scarcity of design methods for irregular fair-faced concrete structures in high seismic intensity regions, the challenge of synergizing architectural aesthetics with seismic performance, and the prominent contradictions between facade integrity and the detailing requirements of precast structures, this study investigates the structural design and seismic performance of a complex, irregular fair-faced concrete structure. The research is based on the Hainan Provincial Art Museum project, located in a high seismic fortification zone of intensity 8.5. By applying fair-faced concrete techniques to precast structures, a synergy between the architectural fair-faced finish and prefabricated construction requirements is achieved. The project employs a reinforced concrete shear wall structural system. To account for multiple structural irregularities, a multi-level and component-specific performance-based seismic design method is established. Furthermore, a “three-joint integration” crack control technology is adopted, and specialized technologies are developed, including embedded steel beam connections, integrated detailing for architecture, structure, and thermal insulation, and parametric form-finding utilizing the inverted hanging method for complex curved roofs. These innovations effectively resolve critical engineering challenges, such as wall crack prevention and control, the reliability of out-of-plane connections between steel beams and shear walls, the synergy of energy conservation

收稿日期：2026-04-26
基金项目：同济设计集团设计研究类自主立项课题（2023J-JG03）
作者简介：戴嘉琦，女，高级工程师，主要从事结构设计。E-mail：12djq@tjad.cn
* **联系作者**：许晓梁，男，正高级工程师，一级注册结构工程师，主要从事复杂建筑结构的设计和研究。E-mail：12xxl@tjad.cn

and structural response in irregular facades, and the matching of architectural form with mechanical performance. Ultimately, this study establishes an integrated architecture-structure design framework for irregular fair-faced concrete buildings in high seismic intensity regions, providing a valuable engineering reference for the design, precast application, and seismic control of similar structures.

Keywords high seismic fortification zone, irregular fair-faced concrete structure, precast construction, seismic performance, integrated architecture-structure design

0 引 言

清水混凝土结构是一次浇筑成型,以混凝土自然原色为饰面,通过表面规则线条、槽孔与肌理实现装饰效果的结构形式[1]。该结构对外观几何尺寸、表面光洁度与色泽均匀性要求严苛,无需二次装饰装修,兼具结构受力、建筑美学表达与全生命周期低碳减排的多重优势,高度契合现代建筑绿色可持续的发展理念[2-3]。近年来,随着模板材料技术与绿色建造工艺的持续迭代,清水混凝土的应用形态从常规平直构件向复杂空间构件逐步拓展,在国内大型公共建筑与重点文化基础设施中得到广泛应用[4-5]。随着建筑造型需求的多元化发展,复杂异形清水混凝土结构可兼顾建筑空间表达与结构受力性能,成为大型公共文化建筑的重要结构选型方向[6-7]。但该类结构构件空间形态复杂,成型难度大与施工精度控制要求高,特别是其几何形状变化对模板的空间定位与高精度拟合造成了极大挑战[8-9]。尤其是异形构件与常规结构组成的混合体系设计,不仅涉及空间传力路径复杂化、构件受力状态多样化等问题,更对结构分析方法与设计技术提出了更高要求[10]。

与此同时,装配式建筑是国家重点推进的建造方式,是当前国内建筑业转型升级的重要方向[11-12]。但清水混凝土与装配式建造技术存在天然的核心技术矛盾,融合应用难度大:清水混凝土对建筑立面完整性、表观效果连续性、色泽均匀性有着极致严苛的要求,而装配式结构以预制构件工厂生产、现场拼接安装为核心建造方式,接缝设置、拼接偏差极易产生明显的接缝痕迹与色差缺陷,直接破坏清水混凝土的整体装饰效果[13-14]。

现有国内外针对清水混凝土的研究,多集中于施工技术领域,核心围绕清水混凝土饰面效果控制[15-17]、材料配合比设计[18]、复杂饰面施工工艺优化[19-21]、模板体系选型与施工控制[22-23]等方向开展。近年来,部分学者也针对局部复杂混凝土构件的成型质量控制与表面微观病害智能检测进行了初步探索[24-25]。然而,针对清水混凝土建筑结构设计方法的系统性研究仍相对匮乏,现有成果多将清水混凝土作为装饰性围护构件开展分析,对其作为主体受力结构的设计方法、受力性能演化规律的研究存在明显不足[22]。特别是在高烈度抗震设防区,复杂异形清水混凝土剪力墙结构的整体稳定性能、刚度突变区关键节点的局部受力机制[26],以及结构-保温一体化构造的协同工作机理[27-28],相关研究仍滞后于工程实践需求,存在亟待补充的技术空白[16,29]。同时,针对复杂异形清水混凝土结构的整体协同分析与建筑结构一体化设计方法,尚未形成完善的技术体系,难以满足同类复杂工程的设计需求[30-32]。

在装配式清水混凝土应用领域,现有研究仍存在明显局限:多数成果聚焦于预制清水混凝土构件的生产工艺、外观质量控制[33],少量针对装配式清水混凝土受力构件的研究,多集中于剪力墙的连接节点抗震性能[34-35],尚未涉及高烈度区复杂异形清水混凝土主体结构与装配式建造的一体化设计。同时,现有研究未形成有效解决清水混凝土立面完整性与装配式拼接构造核心矛盾的系统性设计方法,难以兼顾异形清水建筑的美学表达、主体结构抗震安全与装配式建造要求。

本文以海南省美术馆复杂异形清水混凝土结构为研究对象,针对项目建筑造型与主体受力结构融合的核心设计需求,以及清水混凝土效果与装配式建造的矛盾,开展结构体系分析、数值建模计算与关键设计技术研究。通过引入“三缝合一”裂缝控制技术,优化嵌入式大跨钢梁节点受力性能,结合复杂曲面屋盖逆吊法参数化找形方法,明确复杂异形清水混凝土主体结构的设计路径与关键控制要点,以期为高烈度设防区同类异形公共文化建筑的清水混凝土装配式结构设计与工程实践提供参考依据。

1　工程概况

海南省美术馆位于海口市江东经济开发区，总建筑面积约3.36万 m^2（美术馆主体建筑3.3万 m^2，东部连桥600 m^2），其中地上建筑面积约2.28万 m^2，地下建筑面积约1.08万 m^2。建筑功能以艺术展览为核心，建筑效果图如图1所示。



图1　建筑效果图

Fig.1　Architectural rendering

美术馆展厅平面尺寸约152.4 m×80.8 m，地上2~4层，房屋高度为23.10 m，属于多层建筑。该展厅采用钢筋混凝土剪力墙结构结合屋面钢梁的混合结构体系，以剪力墙作为主要抗侧力构件，楼盖采用钢筋混凝土梁板结构。为满足海南省《装配式建筑装配率计算规则》[36]要求，展厅屋面部分采用钢梁+钢筋桁架组合楼板形式，经计算本项目装配式建筑装配率达到52.4%。

根据《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）[37]，抗震设防烈度为8度，设计基本地震加速度为0.30g，设计地震分组为第二组，场地类别为III类，场地特征周期小震、中震取为0.55 s，大震取为0.60 s。海口市基本风压为0.75 kN/m^2，本项目地面粗糙度类别为B类。

2　基础与下部结构设计

拟建场地地貌类型为南渡江右岸冲洪积一级阶地，区域稳定性较好，无全新活动断裂及不良地质作用。场地内存在液化砂层与厚层震陷软土，属于抗震不利地段，综合判定为不均匀地基。场地地下水为孔隙潜水，水位受降雨及潮汐影响显著，年变幅1.50~2.00 m，抗浮设计水位按室外设计地坪标高控制。

结合场地地质、高烈度抗震设防要求及上部剪力墙荷载特性，本工程采用钻孔灌注桩基础，以层位稳定、厚度大的十层粉质黏土为桩端持力层。桩端进入持力层最小深度为2倍桩径，且伸入液化深度以下稳定土层不小于1.5 m，以消除地基液化沉陷风险。桩基统一采用700 mm设计桩径，按受力分为四类：大荷载区域采用后注浆抗压桩，单桩竖向抗压承载力特征值为2 700 kN；受拔力区域采用后注浆抗压兼抗拔桩，单桩抗压2 700 kN、抗拔1 250 kN；小荷载区域采用普通抗压桩，单桩抗压1 600 kN；纯地下室抗浮区域采用普通抗压兼抗拔桩，单桩抗压1 600 kN、抗拔1 000 kN。

结构设地下1层（局部无地下室），主体以地下室顶板作为上部结构嵌固端，地下一层与首层抗侧刚度比均满足《建筑抗震设计规范》[37]嵌固刚度要求，局部无地下室区域以基础顶面为嵌固端。

3　上部结构设计和分析

3.1　上部结构体系

本结构内部需实现最大27 m的无柱展厅空间，外立面以大面积现浇清水混凝土为核心视觉表达，对结构抗侧性能、空间适配性与建筑效果还原度均提出了较高要求。综合建筑需求与抗震设防标准，本项目上部主体最终采用钢筋混凝土剪力墙结构体系（楼面采用钢筋混凝土梁，屋面采用钢梁），竖向承重与水平抗侧力主要由现浇清水混凝土剪力墙承担，框架柱仅承担竖向荷载、基本不参与抗侧工作，既适配高烈度区的抗震设防要求，也最大程度释放了建筑内部空间，同时现浇剪力墙可直接作为建筑外立面与室内构件，与清水混凝土设计要求高度契合。屋面采用钢梁+钢筋桁架组合楼板，同步满足海南省装配式建筑政策要求。结构体系轴测图如图2所示。

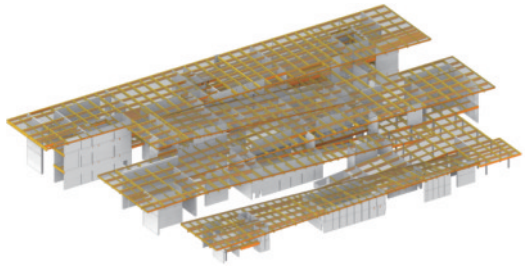


图2　结构体系轴测图

Fig.2　Axonometric view of the structural system

本项目美术馆展厅上部结构核心构件设计参数如表1所示，为提升清水混凝土浇筑后效果，构件混凝土强度等级均采用C40，设计阶段严格控

制剪力墙轴压比不大于0.3、框架柱轴压比不大于0.85，为结构延性与抗震安全提供基础保障。

表 1 上部结构核心构件截面设计参数表

Table 1 Sectional design parameters of core members in the superstructure

构件类型		设计参数/mm
剪力墙		厚度400~600，部分墙肢内置钢骨梁优化节点受力
框架柱	混凝土柱	400×400~600×600、1600×1200
	摇摆柱	200×200×30
框架梁	混凝土梁	300×600~400×1900
	钢梁	H450×200×8×12~H1200×400×30×60
井格梁或次梁	混凝土梁	300×600~400×1900
	钢梁	H300×200×10×14~H1200×400×30×60
楼板		130~150

3.2 结构抗震不规则性分析与性能目标

参考《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》[39]以及《海南省超限高层建筑结构抗震设计要点》[40]，本项目结构存在以下抗震不规则情况：

（1）扭转不规则：三层*Y*向最大位移比为1.38；

（2）偏心布置：三层最大偏心率为15.8%；

（3）楼板不连续：二层*Y*向有效宽度约27%、二层—四层存在错层；

（4）构件间断：竖向抗侧力构件不连续，三层—四层部分位置存在剪力墙上下不连续；

（5）局部不规则：一层—四层部分位置存在跃层墙。

综合判定本项目结构同时存在多项不规则项，属于特别不规则的多层建筑。依据《建筑抗震设计规范》[37]，本项目需进行专门的抗震研究和专项论证。

参考《高层建筑混凝土结构技术规程》[41]，本结构整体抗震性能目标为D级，结合结构特别不规则的受力特点，依据《建筑抗震设计规范》[37]抗震性能化设计相关规定，严格遵循“三水准两阶段”抗震设防原则，采用分地震水准、分构件重要性的精细化抗震性能化设计。设计中将局部框支剪力墙、托墙转换梁、转换柱、跃层剪力墙、大跨度及大悬挑楼屋面钢梁定义为关键构件，要求其在设防烈度地震下正截面与斜截面均不屈服。采用YJK软件进行中震不屈服分析，用以指导关键构件的配筋设计，作为多遇地震组合下构件承载力设计的补充。

本项目需要解决特别不规则结构的抗震安全问题，同时还要满足异形清水混凝土建筑立面完整性、大跨度无柱展厅空间、海南地区节能与装配式相关政策等多项要求。采用常规结构设计方法，难以同时兼顾结构抗震性能、建筑效果还原与工程落地实施的各项要求，给上部结构设计带来较大的困难。为此，本项目针对上述问题与设计要求，开展了多项专项技术研究与创新，既系统解决了高烈度区异形清水混凝土建筑面临的实际工程问题，也实现了建筑效果与结构性能的协同统一，可为同类清水混凝土异形公共建筑的结构设计提供参考。

3.3 专项技术研究

3.3.1 “三缝合一”裂缝控制技术

大面积超长现浇清水混凝土墙体易出现收缩、温度裂缝[42]，且常规分缝方案会破坏立面的完整性[16,43]，针对上述问题本项目创新采用“三缝合一”技术，将三类功能不同的分缝进行高度整合，实现“一缝多能”的设计目标。

该技术将满足建筑立面效果的清水混凝土模板缝、释放超长墙体温度应力的诱导缝、调整结构整体刚度的剪力墙结构竖缝进行一体化设计，缝内填充与清水混凝土同色的改性硅烷密封胶（Modified Silane Sealant，MS胶），外侧配套定制铝合金开模件，在同一构造内同时实现三大核心功能：一是通过模板缝的标准化设计，保障清水混凝土立面的排版美观与完整性；二是通过诱导缝释放超长墙体的温度应力与收缩应力，从根源上控制墙体裂缝发展；三是通过剪力墙结构竖缝调整整体刚度分布，优化结构扭转效应，降低高烈度区的地震作用输入。

该技术在有效解决超长清水混凝土墙体裂缝控制难题的同时，避免了常规分缝对清水混凝土立面完整性的破坏，实现了抗震构造措施与建筑美学表达的深度融合，节点构造如图3所示。

3.3.2 嵌入式钢梁节点设计

针对大跨屋面钢梁与剪力墙面外连接可靠性差、梁端易出现局部受压破坏[44-45]，且传统钢混节点施工复杂、影响室内清水效果的问题，本项目创新采用剪力墙顶嵌入式钢梁节点形式。

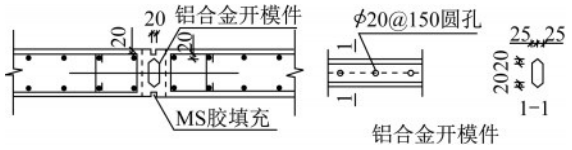


图3　“三缝合一”节点示意图(单位:mm)

Fig.3　Schematic diagram of the “three-joint integration” connection (Unit:mm)

如图4所示,通过在剪力墙顶直接嵌入水平钢梁,有效解决了大跨屋面钢梁与剪力墙面外连接的受力可靠性问题,规避了梁端局部受压破坏风险。同时在相邻剪力墙顶设置贯通钢连梁,相较于传统混凝土连梁,可显著降低结构局部刚度,减少高烈度区的地震力输入。该节点无需在混凝土墙内预埋钢骨柱,大幅简化了现场施工工序,缩短了施工周期。此外,节点完全隐藏于墙体内部,无需额外吊顶遮挡,与室内清水混凝土空间效果要求高度匹配,实现了结构安全、施工便捷与建筑效果的三重统一。

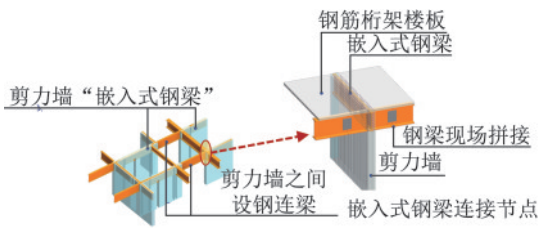


图4　嵌入式钢梁连接节点示意图

Fig.4　Schematic diagram of the embedded steel beam connection

3.3.3　建筑结构保温一体化构造技术

为兼顾建筑波浪形异形外立面造型、当地节能要求与结构整体受力性能,本项目构建了建筑结构保温一体化复合受力体系,改变了传统围护构件与承重构件分离的设计方式。

如图5所示,该体系采用“波浪形清水混凝土外墙+保温夹层+清水混凝土内墙”的三明治式构造。外侧波浪形墙体为现浇清水混凝土构件,不仅实现建筑外立面异形造型与统一质感,同时作为结构构件参与水平力传递,与内侧剪力墙协同受力,形成一体化抗侧体系。该方案同时满足了建筑异形外立面、清水混凝土饰面效果、墙体保温隔热及结构受力安全的设计要求。

3.3.4　复杂曲面屋盖参数化找形

本项目屋顶餐厅采用连续异形曲面屋盖,结构构造如图6所示,屋盖构造为钢板上铺设60 mm厚清水混凝土板协同受力,以此实现异形清水混凝土效果。屋盖几何形态参照海南黎族传统船形屋曲面形制确定,传统设计方法难以同时兼顾建筑形态控制与结构受力合理性。为此,项目采用参数化找形技术,通过数字化迭代分析,实现屋盖建筑形态与结构受力性能的协同匹配。

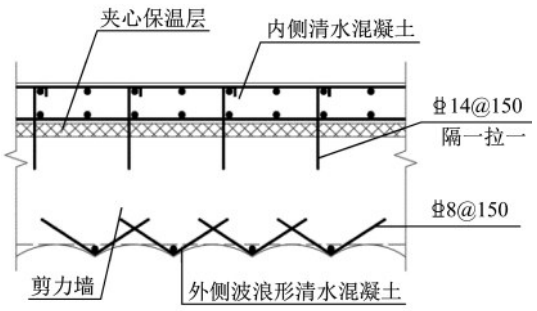


图5　建筑结构保温一体化墙体构造示意图(单位:mm)

Fig.5　Schematic diagram of the integrated wall detailing for architecture, structure, and thermal insulation (Unit: mm)

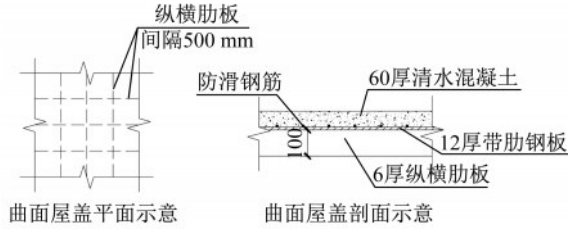


图6　曲面屋盖构造示意图(单位:mm)

Fig.6　Schematic diagram of the curved roof detailing (Unit: mm)

项目分别采用最小应变能法与逆吊法开展多轮参数化找形对比分析:最小应变能法基于屋面初始边界与控制点,采用Galapagos遗传算法迭代求解[46],得到结构应变能最小的优化曲面,该曲面受力性能最优,但与建筑设计形态偏差较大,未予采用;逆吊法[47]利用织物自重变形生成均匀纯拉曲面,经反向映射形成受力合理的结构曲面,通过平面网格划分、约束点设定、反向荷载施加、膜材弹性模量比值迭代调整,可精准匹配建筑设计矢高与形态要求,最终确定为项目屋盖找形方法,其基本原理如图7所示。

经参数化找形确定的最终屋盖曲面,可同时满足建筑几何形态控制要求与结构受力合理性,结构传力路径明确,无显著应力集中区域。最终屋面采用加劲钢板清水混凝土面、方钢细柱和双片剪力墙的组合受力体系(图8),实现竖向承重与水平抗侧功能分离,进一步优化屋盖受力性能,满足建筑轻盈化形态设计要求,达成建筑形态与

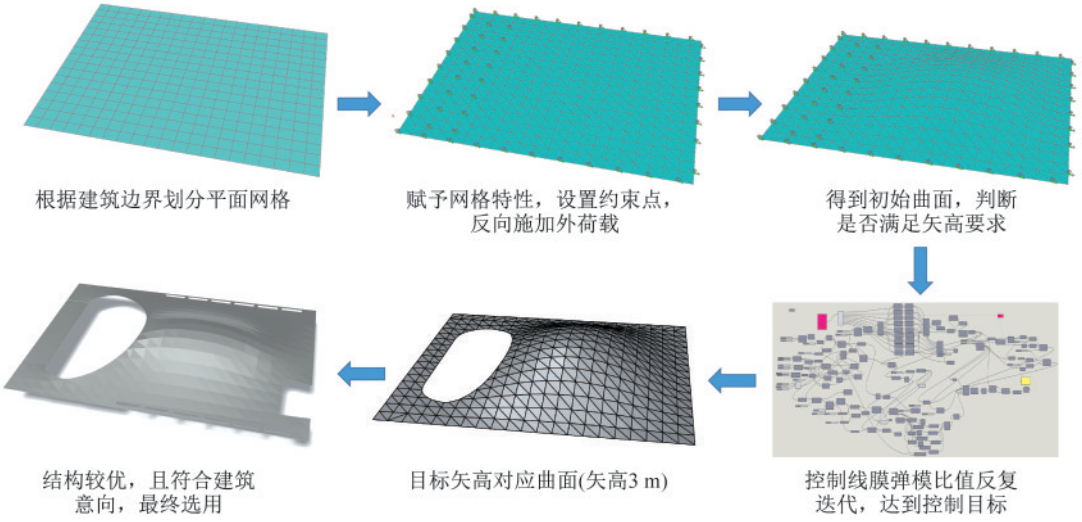


图7 复杂曲面屋盖逆吊法找形全流程示意图

Fig.7 Schematic diagram of the overall form-finding process for the complex curved roof using the inverted hanging method

结构性能的一体化协同设计目标。

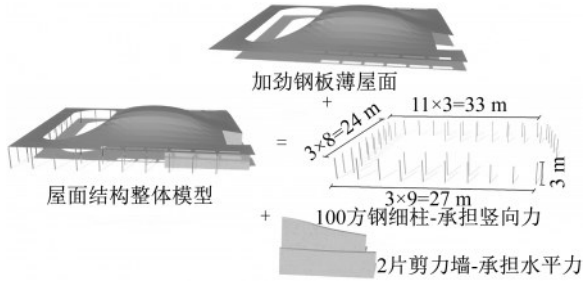


图8 屋面结构体系组成与整体模型示意图

Fig.8 Composition of the roof structural system and schematic diagram of the global model

4 结构计算分析

4.1 多遇地震弹性反应谱分析

本次分析采用YJK（4.3.0版）与MIDAS GEN（2020 V2.1）两款软件建立空间计算模型，开展双模型对比校核。模型的结构布置、材料参数、荷载取值与边界条件保持一致，上部结构嵌固端设置于地下室顶板，局部无地下室区域以基础顶作为嵌固部位。计算模型采用弹性膜单元模拟楼板以真实还原水平地震力传递特性。

地震作用计算采用振型分解反应谱法，通过完全二次型组合法（Complete Quadratic Combination，CQC法）完成扭转耦联振型组合，并考虑偶然偏心与双向地震作用。多遇地震弹性反应谱分析计算结果如表2所示。

YJK与MIDAS GEN计算结果吻合度良好，数据可靠，各项指标的合规性判定如下：

表2 多遇地震弹性反应谱分析计算结果

Table 2 Calculation results of elastic response spectrum analysis under frequent earthquakes

计算指标		计算软件		规范限值
		YJK	MIDAS GEN	
自振周期/s	T_1（x向）	0.216 9	0.210 4	-
	T_2（y向）	0.189 0	0.189 8	-
	T_3（扭转）	0.185 6	0.183 0	-
振型质量参与系数	x向	92.47%	99.70%	≥90%
	y向	90.08%	99.50%	≥90%
扭转周期比	T_3/T_1	0.87	0.87	≤0.90
楼层最大层间位移角	多遇地震（x向）	1/3 521	1/3 786	≤1/1 000
	多遇地震（y向）	1/2 607	1/2 865	≤1/1 000
	风荷载（x向）	1/9 999	1/9 999	≤1/1 000
	风荷载（y向）	1/9 033	1/9 999	≤1/1 000
楼层最大扭转位移比	x向地震	1.37	1.40	≤1.5
	y向地震	1.38	1.38	≤1.5
本层与相邻上层最小抗侧刚度比	x向地震	1.67	—	≥0.70
	y向地震	1.76	—	≥0.70
楼层最小抗剪承载力比	x向地震	1.04	—	≥0.80
	y向地震	1.20	—	≥0.80
底层框架柱承担的地震倾覆力矩占比	x向地震	0.60%	—	—
	y向地震	1.70%	—	—
底层框架柱承担的地震剪力占比	x向地震	0.31%	—	—
	y向地震	0.25%	—	—

（1）结构x、y向振型累计质量参与系数均满足规范不小于90%的要求，扭转周期比0.87小于

规范0.9的限值，结构整体抗扭刚度满足设计要求；

（2）多遇地震与风荷载作用下，结构最大层间位移角远小于1/1 000的规范限值，满足多遇地震下结构完全弹性的性能目标；

（3）考虑偶然偏心的最大扭转位移比1.40，大于1.2的扭转不规则判定限值、小于1.5的严重不规则界限，与前文不规则项判定结论一致；

（4）结构x、y向最小抗侧刚度比、楼层抗剪承载力比、剪重比、竖向构件轴压比均满足规范限值要求，竖向刚度与承载力分布均匀，无薄弱层，构件延性满足设计要求；

（5）底层框架柱承担的地震倾覆力矩与剪力占比均不足2%，水平地震作用主要由剪力墙承担，结构受力特性与剪力墙体系设计假定相符。

4.2　设防烈度地震分析

本次采用等效弹性验算方法，通过YJK软件开展设防烈度地震（中震）不屈服分析，明确关键构件在中震作用下的受力性能，具体分析参数如表3所示，阻尼比等关键参数取值参考《建筑抗震设计规范》（GB 50011—2010）[37]。

表3　设防烈度地震分析参数取值

Table 3　Parameter values for seismic analysis under fortification earthquakes

参数名称	取值
地震影响系数最大值	0.68
场地土特征周期	0.55s
阻尼比	0.06
剪力墙连梁刚度折减系数	0.4
地震组合内力调整系数	1.0
作用分项系数和材料分项系数	1.0
抗震承载力调整系数	1.0
材料强度取值	标准值
风荷载	不考虑
是否考虑双向地震作用	否

对部分构件设定性能目标，控制其在设防烈度地震作用下正截面、斜截面均不屈服。计算结果表明：

（1）托墙转换梁、转换柱在中震作用下未出现超筋情况，与多遇地震组合下的配筋结果相比，仅个别构件配筋略有增加；

（2）框支剪力墙、跃层剪力墙在中震作用下未出现超筋情况，部分墙肢水平钢筋、竖向钢筋配筋率有所提高，个别边缘构件配筋由构造配筋调整为计算配筋；

（3）楼屋面大跨度钢梁在中震下应力比均小于1.0，满足中震不屈服的性能要求。

4.3　罕遇地震静力弹塑性分析

为明确结构罕遇地震（大震）下的抗震性能，采用YJK软件对主楼开展静力弹塑性（Push-over）推覆分析，通过大震性能点下的层间位移角、层剪力等核心指标验证“大震不倒”的设防要求，同时结合塑性发展顺序识别结构薄弱区域。

根据《建筑抗震设计规范》[37]第5.5.3条，本结构响应以基本振型为主，可采用静力弹塑性分析方法，主要步骤如下：

（1）在结构构件预设塑性铰，采用单调递增水平荷载开展推覆计算，获取结构基底剪力-顶点位移曲线；

（2）将上述曲线转换为谱加速度-谱位移（Acceleration-Displacement，AD）格式的能力谱曲线，结合罕遇地震水准、考虑等效阻尼比折减得到弹塑性需求谱；

（3）能力谱与需求谱的交点即为性能点，对应结构在罕遇地震下的实际响应状态，通过性能点对应的塑性铰分布、层间位移等指标，可综合评估结构抗震能力。

本次推覆分析采用规范规定的水平地震力模式加载，分析结果可作为大震等效弹性分析的参数取值参考，x、y向罕遇地震下的能力谱与需求谱曲线见图9。

计算结果显示，x向罕遇地震下性能点对应的最大层间位移角为1/995，y向为1/1 104，均满足《建筑抗震设计规范》[37]罕遇地震下层间位移角不大于1/120的限值要求。

结构塑性铰发展规律如下：x向加载至第10步时，塑性铰首次出现在个别框架梁端；加载至第20步时，塑性扩展至部分洞口连梁与底层墙肢；加载至第29步（性能点）时，塑性范围扩大至部分楼层墙肢、洞口连梁及底层墙肢，大部分剪力墙仍保持弹性，结构整体仅进入轻微塑性状态。y向加载规律与x向一致，第12步梁端首次出现塑性铰，第20步扩展至底层及局部墙肢，加载至第25步（性能点）时，大部分剪力墙仍保持弹性。整个塑性发展过程符合“强墙肢弱连梁、强柱弱梁”的

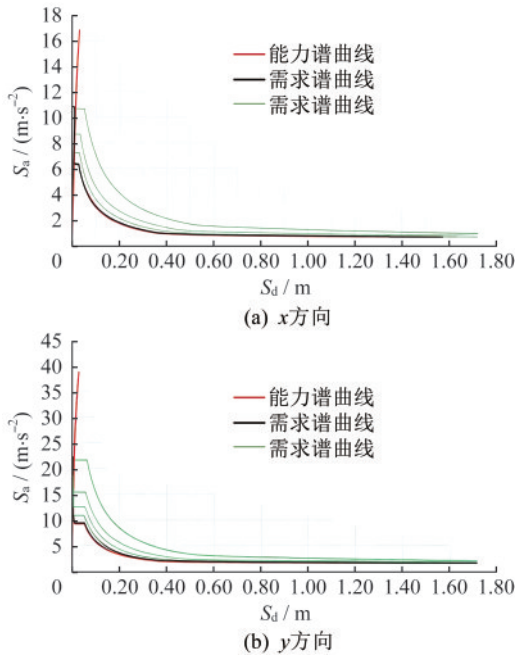


图9 罕遇地震能力谱与需求谱曲线

Fig.9 Capacity spectrum and demand spectrum curves under rare earthquakes

抗震设计原则，结构耗能机制合理，具备良好的抗震变形与耗能能力。

综上，静力弹塑性分析结果表明：罕遇地震作用下，结构性能点对应的层间位移角满足规范限值要求，具备充足的承载能力与延性变形能力；塑性铰先出现在梁端、连梁，后扩展至局部墙肢，损伤发展机制合理，符合抗震设计原则，结构整体满足“大震不倒”的抗震设防目标。

4.4 专项计算分析

4.4.1 楼板应力分析

本项目存在扭转不规则、偏心布置、楼板不连续、构件间断等多项抗震不规则项，楼板作为水平地震作用传递与分配的核心构件，承担着协调同一楼层内竖向构件变形、保证结构整体协同工作的作用。为明确不同地震水准下楼板的应力分布特征，验证其水平力传递功能的可靠性，本研究采用YJK软件，分别开展多遇地震下楼板弹性分析与设防烈度地震下楼板不屈服分析，分析结果用于指导关键部位楼板的结构设计。

本次分析全楼楼板采用弹性膜单元建模，不引入刚性楼板假定，以真实模拟楼板的实际面内及面外刚度。楼板混凝土强度等级为C40，轴心抗拉强度设计值为1.71 MPa，弹性模量为3.25×10^4 N/mm^2；楼板受力钢筋采用HRB400级钢筋，抗拉强度标准值为400 MPa。

多遇地震弹性分析结果表明：地震作用下，各楼层楼板主拉应力峰值均集中于大开洞周边、楼板凹角等应力集中区域；除上述局部应力集中区域外，全楼各楼层绝大部分区域楼板主拉应力均小于C40混凝土轴心抗拉强度设计值1.71 MPa，多遇地震下楼板主体区域可保持弹性工作状态，仅洞口周边、凹角等薄弱区域需针对性采取配筋加强措施。多遇地震下部分楼板应力分布见图10。

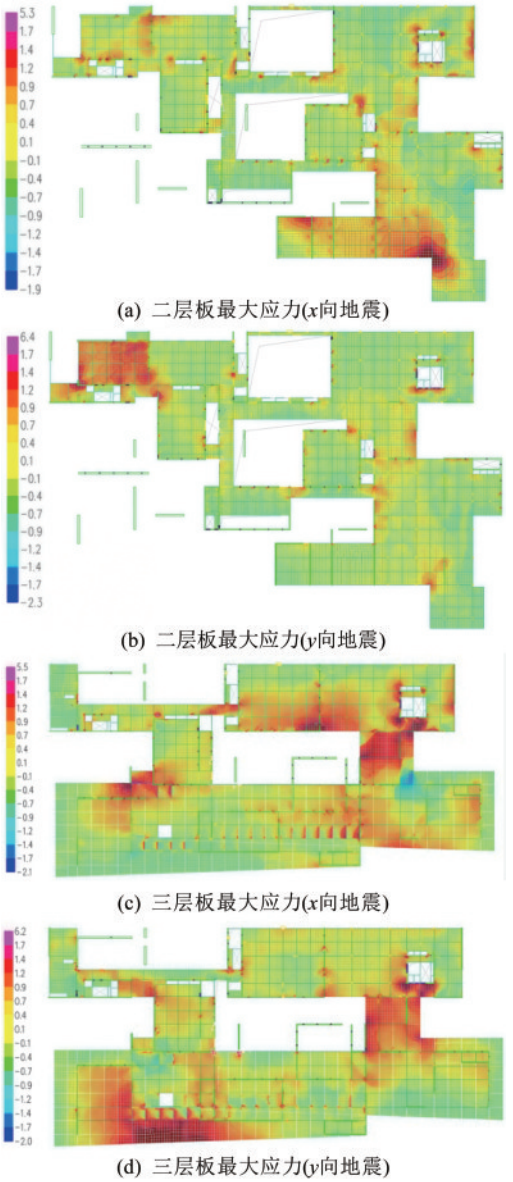
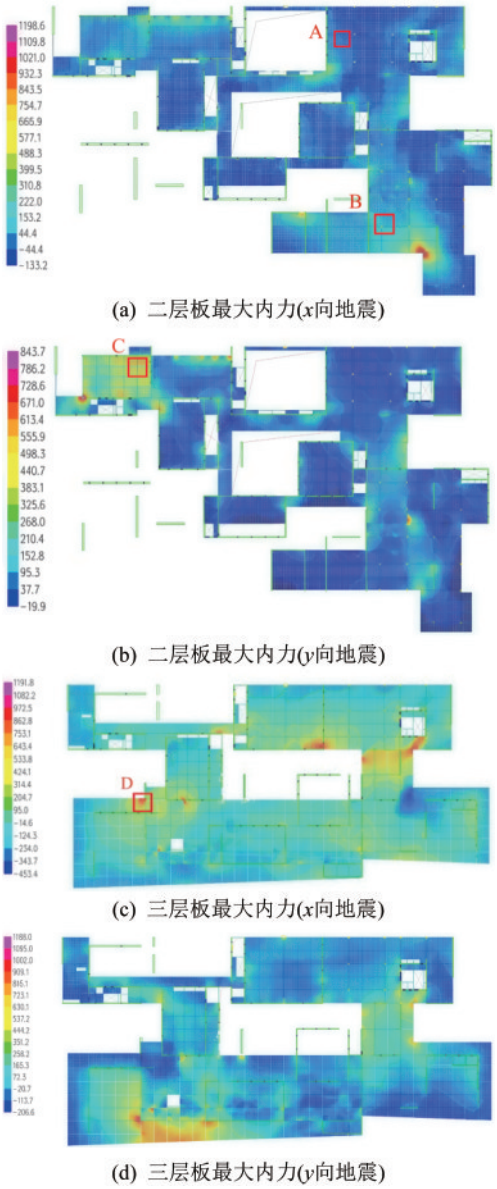


图10 小震弹性下部分楼板应力(单位：MPa)

Fig.10 Stress of partial floor slabs under the elastic state of frequent earthquakes (Unit: MPa)

设防烈度地震不屈服分析采用等效弹性方法，验算时取单位宽度（1 m）楼板带，将轴向拉力与面外弯矩产生的钢筋拉应力叠加，控制总拉应力不超过HRB400钢筋抗拉强度标准值400 MPa。中震作用下各楼层楼板内力分布如图11所示。



(a) 二层板最大内力(*x*向地震)

(b) 二层板最大内力(*y*向地震)

(c) 三层板最大内力(*x*向地震)

(d) 三层板最大内力(*y*向地震)

图11　中震不屈服下部分楼板内力（单位：MPa）

Fig.11　Internal forces of partial floor slabs under the unyielding state of fortification earthquakes (Unit: MPa)

中震不屈服验算共选取4个控制截面，分别对应图11中标注的A、B、C、D共4个核心区域，覆盖楼板典型受力区域与内力集中的薄弱区域，各区域验算结果如下：

（1）区域A为二层楼板典型区域，板厚130 mm，采用顶筋10@150、底筋10@200的配筋方案，验算得到钢筋总拉应力为341 MPa；

（2）区域B为二层楼板典型受力区域，板厚130 mm，配筋（顶筋通长）10@150、（底筋通长）10@200，附加顶筋10@150、附加底筋10@200时，验算得到钢筋总拉应力为355 MPa；

（3）区域C为二层楼板内力较大区域，板厚130 mm，采用与区域B一致的配筋方案，验算得到钢筋总拉应力为367 MPa；

（4）区域D为三层楼板内力较大区域，板厚140 mm，采用*X*向顶筋14@188、底筋12@94附加8@188的配筋方案，验算得到钢筋总拉应力为388 MPa；

所有控制截面的钢筋总拉应力均小于HRB400钢筋抗拉强度标准值400 MPa，满足中震不屈服的抗震性能目标要求。

结合上述楼板应力分析结果，针对楼板薄弱区域采取针对性加强措施：①对大开洞周边、楼板凹角等应力集中区域，配置双层双向通长钢筋，并在楼板阴角处附加45°斜向双层钢筋，缓解局部应力集中问题；②对楼板不连续、弱连接区域，加厚楼板并采用双层双向通长配筋，按中震不屈服验算结果包络设计；③对周边边梁、连梁及开大洞楼层洞口处的边梁，除满足计算的配筋要求外，尽量拉通面筋，并适当加强腰筋配置，降低地震作用下楼板支座位置的开裂风险，提升楼板整体受力性能；④与跃层剪力墙、跃层柱相连的楼板区域加厚处理并加强配筋，保证竖向构件水平力的有效传递。

4.4.2　跃层剪力墙稳定验算

本项目一层至屋面层局部存在跃层剪力墙，最大跃层层高为19.0 m。参考《高层建筑混凝土结构技术规程》（JGJ 3—2010）[41]附录D，采用以下公式对局部跃层剪力墙进行墙体稳定验算：

$$q \leqslant \frac{E_c t^3}{10 l_0^2} \tag{1}$$

式中：q为作用于墙顶组合的等效竖向均布荷载设计值，单位为kN/m；E_c为剪力墙混凝土的弹性模量，单位为MPa；t为剪力墙墙肢截面厚度，单位为mm；l_0为剪力墙墙肢计算长度，按照下式进行计算，单位为m。

$$l_0 = \beta h \tag{2}$$

式中：β为墙肢计算长度系数，对于单片独立墙肢按两边支撑板计算，取1；h为墙肢所在楼层的层

高，单位为m。

跃层墙墙肢编号详见图12，以跃层墙肢Q1为例，墙肢厚度t=600 mm，跃层层高h=19.0 m，墙肢计算长度系数β=1.0，计算长度$l_0=\beta h=19.0$ m。混凝土强度等级为C40，弹性模量$E_c=3.25\times10^4$ MPa，由整体模型提取墙肢最不利组合下的等效竖向荷载设计值$q=812$ kN/m。代入公式(1)计算得墙肢等效临界荷载后，与q对比判断稳定性。各墙肢计算结果汇总于表4，跃层剪力墙墙体稳定验算均满足要求。

表4　跃层剪力墙稳定验算结果

Table 4　Stability verification results of cross-story shear walls

墙肢编号	墙厚t/mm	墙肢高度h/m	墙肢计算长度l_0/m	$E_ct^3/(10l_0^2)$/(kN·m^{-1})	墙顶等效竖向均布荷载设计值q/(kN·m^{-1})	墙肢稳定验算是否满足
Q1	600	19	19	1 945	812	是
Q2	600	19	19	1 945	932	是
Q3	600	13	13	4 490	1 327	是

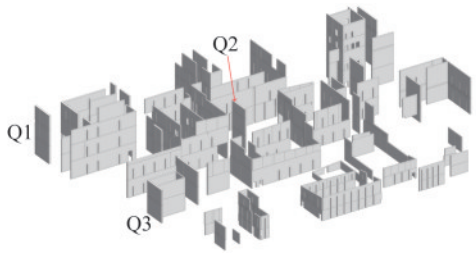


图12　跃层竖向构件编号

Fig.12　Numbering of cross-story vertical members

5　结　论

本文以海南省美术馆复杂异形清水混凝土装配式结构为研究对象，针对8度半高烈度区特别不规则建筑的设计需求，围绕清水混凝土工艺应用于装配式结构的目标，系统完成了结构体系选型、抗震性能化设计、专项技术创新与结构计算分析工作，主要得到以下结论：

(1) 本项目采用的钢筋混凝土剪力墙结构体系，可同时适配高烈度区抗震设防要求、大跨度无柱展厅空间需求、装配式建造要求与异形清水混凝土建筑效果，结构受力特性与设计要求高度匹配，为同类异形清水混凝土公共建筑的合理结构选型。

(2) 多遇地震、设防烈度地震、罕遇地震的多水准计算结果表明，结构各项动力特性、变形与承载力指标均满足规范限值要求，塑性发展机制合理，可实现“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准抗震设防目标。

(3) 本文提出的“三缝合一”裂缝控制、嵌入式钢梁节点、建筑结构保温一体化及加肋异形钢板组合上铺清水板屋盖参数化找形专项技术，有效解决了超长清水混凝土墙体裂缝控制、异形立面完整性保护等工程难题，同时兼顾装配式建造的实施要求，实现了建筑美学与结构安全的深度融合。

(4) 针对楼板不连续、跃层构件等不规则项开展的专项分析，明确了结构薄弱区域并采取了针对性加强措施，可为高烈度区同类特别不规则异形建筑的结构设计提供成熟的技术参考与实践依据。

(5) 本文研究成果基于8度抗震设防(0.30g)、III类场地、多层建筑的具体工程条件得出，所提出的“构造-计算一体化裂缝控制”、嵌入式梁柱节点、曲面屋盖逆吊法找形等专项技术，其适用性已在钢筋混凝土剪力墙结构体系中得到验证。对于不同设防烈度、场地类别、结构体系(如框架-剪力墙、框架-核心筒)或建筑高度的项目，相关设计参数和构造措施需结合具体条件进一步论证。

参　考　文　献

[1] 王超，谢发祥，李丹. 南京三桥清水混凝土施工组织浅谈[J]. 土木工程学报，2007，40(4)：44-48.
Wang Chao, Xie Faxiang, Li Dan. Management of as-cast finish concrete construction for the 3rd Nanjing Yangtze River Bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(4): 44-48. (in Chinese)

[2] 侯明华，王旭峰，蒋金生. 清水混凝土工程技术的发展研究[J]. 施工技术，2005，34(3)：12-14.
Hou Minghua, Wang Xufeng, Jiang Jinsheng. The research on technology of as-cast concrete developing [J]. Construction Technology, 2005, 34(3): 12-14. (in

Chinese)

[3] Chunxiang Q, Wenxiong D. Analysis method of apparent quality of fair-faced concrete based on convolutional neural network machine learning [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 108154.

[4] 李强,孟闻远,李辛民,等.清水混凝土工程模板体系的分析、选型与设计[J].混凝土,2006,28(11):82-86.
Li Qiang, Meng Wenyuan, Li Xinmin, et al. Analysis, selection and design of formwork system of as-cast-finish concrete project[J].Concrete, 2006, 28(11): 82-86.(in Chinese)

[5] Shiyang Z, Changzheng F, Yaoyao F, et al. Jingang Cultural Center: Complex-shaped fair-faced concrete structure [J]. Structural Engineering International, 2023, 33(3): 425-430.

[6] 许必强,汪焱卫,吴文奎,等.空间多曲面清水混凝土全木模板施工工艺研究[J].施工技术,2017,46(14):54-57,78.
Xu Biqiang, Wang Yanwei, Wu Wenkui, et al.Study on the construction method for space polygonal fair-faced concrete structure using wood template [J]. Construction Technology, 2017, 46(14): 54-57, 78.(in Chinese)

[7] Eleonora C, Luigi F, Bruno B. Comparison of form-finding methods to shape concrete shells for curved footbridges [J]. Structural Engineering International, 2021, 31(4): 527-535.

[8] 庞程程,王刚,沈洁,等.超大截面异形曲面清水混凝土墩台柱组合模板施工技术[J].建筑结构,2020,50(S2):856-860.
Pang Chengcheng, Wang Gang, Shen Jie, et al. Construction technology of composite formwork for super large section special-shaped curved fair-faced concrete pier column[J].Building Structure, 2020, 50(S2): 856-860.(in Chinese)

[9] Yifan P, Yulu Z, Dakang Z, et al.Effect of polymer and conventional molds on the aesthetical surface quality of concretes[J].Construction and Building Materials, 2021, 302: 124375.

[10] Hung C C, Li H, Chen H C. High-strength steel reinforced squat UHPFRC shear walls: Cyclic behavior and design implications [J]. Engineering Structures, 2017, 141: 59-74.

[11] 阿热帕提·艾斯凯尔,陈国新.预制装配式混凝土结构节点连接方式研究综述[J].结构工程师,2020,36(5):224-233.
Aisikaier Arepati, Chen Guoxin. Summary of investigation on joint form of precast concrete structure joints [J]. Structural Engineers, 2020, 36(5): 224-233.(in Chinese)

[12] 汪震,李检保.我国预制剪力墙结构的历史与现状概述[J].结构工程师,2015,31(3):180-186.
Wang Zhen, Li Jianbao. Review of the studies on precast concrete shear wall in China [J]. Structural Engineers, 2015, 31(3): 180-186.(in Chinese)

[13] 蓝丽江,路丹.装配式防浪墙用清水混凝土配制与应用研究[J].混凝土,2024(6):202-205.
Lan Lijiang, Lu Dan. Research on preparation and application of clear water concrete for prefabricated wave walls [J]. Concrete, 2024(6): 202-205.(in Chinese)

[14] 何斌.清水混凝土装配式结构低碳建造关键技术研究与应用[J].砖瓦,2025,(9):159-161.
He Bin. Research and application of key technologies for low-carbon construction of fair-faced concrete prefabricated structures[J].Brick-Tile, 2025(9): 159-161.(in Chinese)

[15] 牟廷敏,丁庆军,黄修林,等.浆体黏度对清水混凝土表观质量的影响[J].混凝土,2015(2):104-106.
Mou Tingmin, Ding Qingjun, Huang Xiulin, et al. Effects of slurry viscosity on appearance quality of fair-faced concrete [J]. Concrete, 2015(2): 104-106.(in Chinese)

[16] 崔鑫,于振水,路林海,等.清水混凝土的性能研究、生产及施工技术综述[J].混凝土,2017(1):102-106.
Cui Xin, Yu Zhenshui, Lu Linhai, et al. Review on performance research, production and construction technology of fair-faced concrete[J].Concrete, 2017, (1): 102-106.(in Chinese)

[17] Liu B, Yang T, Xie Y.Factors influencing bugholes on concrete surface analyzed by image processing technology [J]. Construction and Building Materials, 2017, 153: 897-907.

[18] 何锦华,王守合,杜建峰,等.超大面积清水混凝土结构清水混凝土配制及施工技术[J].混凝土,2006(6):77-79.
He Jinhua, Wang Shouhe, Du Jianfeng, et al. Preparation and construction technology of fair-faced concrete for super large area fair-faced concrete structure[J].Concrete, 2006(6): 77-79.(in Chinese)

[19] 任志平,张兴志,高育欣,等.成都来福士广场复杂饰面清水混凝土施工技术[J].施工技术,2012,41(10):1-7,39.
Ren Zhiping, Zhang Xingzhi, Gao Yuxin, et al.

Construction of complicated fair-faced concrete in Raffles City Chengdu [J]. Construction Technology, 2012,41(10):1-7,39.(in Chinese)

[20] Giedrius S, Mindaugas D, SvajūNas J, et al. The influence of new and used formwork coated with different release agents on the appearance of the formed concrete surface [J]. Journal of Building Engineering,2021,42:102807.

[21] Shi Jianhua, Qian Chunxiang, Hao Zhexin. Effects of equipment parameters, ambient parameters and concrete surface moisture on the acquisition of fair-faced concrete appearance quality information [J]. Journal of Building Engineering,2023,72:106476.

[22] 王庆伟.清水混凝土模板施工控制难点及预防措施[J].建筑技术,2010,41(1):38-40.
Wang Qingwei. Difficulty in control of fair-faced concrete template and prevention measures [J]. Building Technology, 2010, 41 (1): 38-40. (in Chinese)

[23] 郭朋岗,陈晓东,郭敬,等.复杂异型清水混凝土模板施工技术应用[J].建筑结构,2020,50(S1):782-784.
Guo Penggang, Chen Xiaodong, Guo Jing, et al. Construction technology application of complex special-shaped fair faced concrete formwork [J]. Building Structure, 2020, 50 (S1): 782-784. (in Chinese)

[24] 吴志华,罗创涟,刘爱荣,等.桥梁水下结构病害智能检测方法[J].结构工程师,2023,39(6):9-17.
Wu Zhihua, Luo Chuanglian, Liu Airong, et al. Intelligent damage detection method for underwater bridge structure [J]. Structural Engineers, 2023, 39 (6):9-17.(in Chinese)

[25] 李斌,丁勇,谢东辉,等.基于靶标的小角度结构缝平面检测算法与应用[J].水利水运工程学报,2023(6):109-116.
Li Bin, Ding Yong, Xie Donghui, et al. Detection algorithm and application of small angle concrete structure joint plane based on target recognition [J]. Hydro-Science and Engineering, 2023 (6): 109-116. (in Chinese)

[26] 赵楠,徐小童,肖明,等.高烈度区大高宽比装配式剪力墙结构抗震性能设计实践[J].建筑结构,2025,55(1):91-94,100.
Zhao Nan, Xu Xiaotong, Xiao Ming, et al. Seismic performance design practice of large height-width ratio assembled shear wall structure in high intensity area [J]. Building Structure, 2025, 55 (1): 91-94, 100. (in Chinese)

[27] 丁虹,高育欣,徐芬莲,等.C60高性能白色清水混凝土的试验研究[J].新型建筑材料,2012,39(5):83-86.
Ding Hong, Gao Yuxin, Xu Fenlian, et al. Experiment research of C60 high performance white fair-faced concrete [J]. New Building Materials, 2012, 39 (5): 83-86.(in Chinese)

[28] 马少春,谷宇,鲍鹏.一种新型结构与保温一体化复合墙板节点试验[J].防灾减灾工程学报,2024,44(2):396-403.
Ma Shaochun, Gu Yu, Bao Peng. Experimental study on a new type of composite wall panel joint integrating load bearing and thermal insulation [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(2):396-403.(in Chinese)

[29] 李强,李辛民,孟闻远,等.我国清水混凝土技术发展现状、存在问题及对策[J].建筑技术,2007(1):6-8.
Li Qiang, Li Xinmin, Meng Wenyuan, et al. Development status of finish concrete technology in our country and its existing problems and countermeasures[J].Building Technology,2007(1):6-8.(in Chinese)

[30] Mazza F. Modelling and nonlinear static analysis of reinforced concrete framed buildings irregular in plan [J].Engineering Structures,2014,80:98-108.

[31] Makhoul Nisrine, Roohi Milad, van de Lindt J W, et al. Seismic resilience of interdependent built environment for integrating structural health monitoring and emerging technologies in decision-making [J]. Structural Engineering International, 2024, 34 (1): 19-33.

[32] Ning C, Xie Y, Burton H, et al. Enabling efficient regional seismic fragility assessment of multi-component bridge portfolios through Gaussian process regression and active learning [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2024, 53 (9): 2929-2949.

[33] 蒋勤俭.国内外装配式混凝土建筑发展综述[J].建筑技术,2010,41(12):1074-1077.
Jiang Qinjian. Summary on development of assembled concrete building both home and abroad [J]. Building Technology,2010,41(12):1074-1077.(in Chinese)

[34] 程曦.清水混凝土墙结构节点设计[J].建筑结构,2026,56(2):117-120.
Cheng Xi. Joint design of fair-faced concrete wall structure [J]. Building Structure, 2026, 56 (2): 117-

120.(in Chinese)

[35] 洪文明,宾志强.某艺术馆超长清水混凝土墙结构设计及构造要点[C]//中国建设科技集团股份有限公司,中南建筑设计院股份有限公司,湖北省勘察设计协会,湖北省土木建筑学会.第十届建筑结构技术交流会论文集(下册).同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司,2025:98-102.
Hong Wenming, Bin Zhiqiang. Structural design and structural points of ultra-long fair-faced concrete wall of an art museum [C]//Proceedings of the 10th Building Structure Technology Exchange Conference (Volume 2),2025:98-102.(in Chinese)

[36] DBJ/T 1-100—2021 海南省装配式建筑评价标准[S].
DBJ/T 1-100—2021 Evaluation standard for prefabricated buildings in Hainan Province [S]. (in Chinese)

[37] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S].(in Chinese)

[38] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S].
GB 50007—2011 Code for design of building foundations[S].(in Chinese)

[39] 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点[S].
Technical points for special review on seismic fortification of out-of-code high-rise building projects [S].(in Chinese)

[40] 海南省超限高层建筑结构抗震设计要点(试行)[S].
Technical points for seismic design of out-of-code high-rise building structures in Hainan province (Trial)[S]. (in Chinese)

[41] JGJ 3—2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S].
JGJ 3—2010 Technical specification for concrete structures of tall buildings[S].(in Chinese)

[42] 郭伟,路林海,王龙志,等.清水混凝土概念、研究现状、存在问题及配合比设计方法综述[J].混凝土与水泥制品,2016(10):23-27.
Guo Wei, Lu Linhai, Wang Longzhi, et al. Seismic performance test and numerical simulation of steel reinforced high-strength concrete shear walls [J]. Concrete and Cement Products, 2016(10): 23-27.(in Chinese)

[43] 杜福祥,张兴志,陈仲吉,等.无明缝无穿墙螺栓浅色饰面清水混凝土结构施工技术[J].施工技术,2011,40(22):55-61.
Du Fuxiang, Zhang Xingzhi, Chen Zhongji, et al. Construction of light-colored fair-faced concrete structure without apparent joint and typed wall bolt [J]. Construction Technology, 2011, 40(22): 55-61. (in Chinese)

[44] 方瑜,黄忠华,吴祖咸,等.新型半刚性梁-柱节点钢框架结构承载性能数值模拟研究[J].结构工程师,2026,42(1):17-24.
Fang Yu, Huang Zhonghua, Wu Zuxian, et al. Numerical simulation study on load-bearing performance of steel frame structures with new semi-rigid beam-column joints [J]. Structural Engineers, 2026,42(1):17-24.(in Chinese)

[45] 张强,吕西林,赵斌,等.型钢-高强混凝土剪力墙抗震性能试验及数值模拟分析[J].结构工程师,2025,41(3):104-114.
Zhang Qiang, Lü Xilin, Zhao Bin, et al. Seismic performance test and numerical simulation of steel reinforced high-strength concrete shear walls [J]. Structural Engineers, 2025, 41(3): 104-114. (in Chinese)

[46] Kumar D S, Nicholas F, Patrizia T, et al.Computational approach for form-finding optimal design [J]. Architecture, Structures and Construction, 2022, 2(3):323-333.

[47] 武岳,苏岩,李清朋,等.自由曲面薄壳结构数值逆吊找形方法研究[J].建筑结构学报,2018,39(3):19-25.
Wu Yue, Su Yan, Li Qingpeng, et al. Study on numerical inverse hanging method for freeform shell structure[J].Journal of Building Structures, 2018, 39(3):19-25.(in Chinese)