

装配式复合模壳剪力墙体系结构性能分析

王明杰 黄立中 王妥凤 彭 丁

中国建筑第四工程局有限公司 广东 广州 510000

摘要：装配式复合模壳剪力墙体系以复合模壳为核心，兼具轻量化、模块化等优势。本文从承载、变形、抗震、耐久性性能展开分析，探讨材料特性、构造设计、施工工艺对结构性能的影响。针对现存问题，提出材料、构造、工艺优化方向，旨在提升体系结构性能，为该体系在建筑领域广泛应用提供理论支持与实践参考。

关键词：装配式复合模壳剪力墙；结构性能；承载性能；抗震性能；优化方向

引言：在建筑工业化与绿色建筑发展背景下，装配式结构因高效、环保等优势广泛应用。传统与普通装配式剪力墙存在自重较大、施工效率低等问题，装配式复合模壳剪力墙体系应运而生。该体系凭借轻量化、模块化特点，展现出良好应用潜力。深入分析其结构性能、影响因素及优化方向，对完善体系设计、保障结构安全、推动行业技术升级具有重要意义，也是满足现代建筑对高效与高性能需求的关键课题。

1 装配式复合模壳剪力墙体系的基础认知

1.1 体系构成与组装逻辑

复合模壳作为体系核心组件，材料组成涵盖基材、增强材料与连接件。基材多选用轻质混凝土、高分子复合材料等具备一定强度与耐久性的材料，增强材料常以纤维网、钢筋骨架等形式嵌入基材内部，提升模壳整体抗裂与承载能力，连接件则采用金属或高强度复合材料制成，用于模壳间及模壳与剪力墙构件的连接固定，结构形式多设计为中空或蜂窝状，兼顾轻量化与力学性能^[1]。剪力墙构件的预制生产流程需先按设计尺寸加工复合模壳，再在模壳内部布设钢筋骨架，随后浇筑混凝土并养护成型，现场装配时需通过连接件将预制剪力墙构件与基础、梁体等结构精准对接，做好接缝处的灌浆或锚固处理，确保构件间衔接紧密。整体体系的空间受力架构以剪力墙构件为主要受力单元，通过连接件形成整体受力体系，传力路径设计原理为将竖向荷载通过剪力墙构件传递至基础，水平荷载则通过构件间的协同作用分散传递，避免局部应力集中。

1.2 体系核心特征

与传统现浇剪力墙相比，该体系在材料上减少现场湿作业所需的模板与支撑材料，降低施工阶段的材料浪费，构造上通过预制构件简化现场施工流程，减少现场人工投入，施工周期大幅缩短；与普通装配式剪力墙相比，模壳材料更具轻量化优势，运输与吊装过程中的能

耗降低，构造上通过复合模壳与混凝土的协同作用提升整体性能，施工中无需额外设置大量模板，装配效率更高。体系在轻量化方面依托复合模壳的中空结构与轻质材料，降低结构自重的同时保障力学性能，减轻建筑基础的承载压力；模块化方面将剪力墙拆分为标准化预制构件，可根据建筑需求灵活组合，适应不同户型与结构设计，甚至能适配部分异形建筑的墙体构造；工业化生产方面实现模壳加工、构件预制的工厂化作业，减少现场施工误差，提升构件质量稳定性，工厂生产可集中处理施工废弃物，减少对周边环境的影响，契合建筑工业化发展需求。

2 装配式复合模壳剪力墙体系关键结构性能分析维度

2.1 承载性能分析

竖向抗压性能分析需关注体系在竖向荷载作用下的承载力变化，通过试验观察荷载增加过程中体系的应力分布情况，明确承载力极限值，记录不同荷载阶段的变形数据，总结变形规律，判断是否出现压缩变形过大或局部压溃等破坏模式，为结构竖向承重设计提供依据。需特别关注模壳与混凝土协同受压的状态，避免因两者受力不均衡导致局部提前破坏，影响整体承载效率。水平抗剪性能探究需模拟地震、风荷载等水平荷载作用，测试体系在不同水平荷载等级下的抗剪承载力，分析剪切变形随荷载变化的特征，观察是否出现剪切裂缝或剪切破坏，确保体系在水平荷载下具备足够抗剪能力。需重点考察节点区域的抗剪性能，节点作为力传递的关键部位，其抗剪能力直接影响体系整体抗侧力效果。抗弯性能研究需通过施加弯矩荷载，测定体系的抗弯承载力，分析截面内力在不同荷载阶段的分布情况，记录挠曲变形数据，掌握变形随弯矩变化的规律，避免体系因抗弯能力不足出现弯曲破坏。需关注截面中性轴位置的变化，中性轴偏移可能导致截面受力状态改变，影响抗弯性能评估的准确性。

2.2 变形性能分析

弹性变形分析聚焦体系在弹性阶段的变形能力，通过荷载试验获取弹性阶段的变形数据，判断变形是否在设计允许范围内，检查构件间、模壳与混凝土间的变形协调性，确保各部分变形同步，避免因变形不协调产生附加应力。需考虑不同构件连接部位的变形传递效率，连接部位变形传递不畅易引发局部应力集中。塑性变形探究需持续加载至体系进入塑性阶段，观察变形发展趋势，记录塑性变形量，评估体系的延性表现，延性越好，体系在遭遇突发荷载时越能通过塑性变形吸收能量，减少脆性破坏风险。需分析塑性铰出现的位置与顺序，塑性铰的合理分布可提升体系整体抗震冗余度。长期变形研究需模拟自重、恒荷载等长期作用环境，监测体系的徐变、收缩变形，分析变形随时间变化的特征，为结构长期使用中的变形控制与维护提供参考，避免长期变形过大影响建筑正常使用。需结合环境温湿度变化对长期变形的影响，温湿度波动可能加速徐变与收缩进程，需纳入分析范畴。

2.3 抗震性能分析

动力响应分析需通过动力加载试验，模拟地震等动力荷载作用，测试体系的振动特性，记录不同振动频率下的加速度与位移响应数据，掌握体系在动力荷载下的受力状态，为抗震设计中的动力参数选取提供支持^[2]。需关注体系共振频率的变化，共振可能导致动力响应放大，增加结构破坏风险。耗能能力探究需观察体系在地震作用下的能量耗散过程，分析模壳变形、混凝土裂缝开展、连接件滑动等耗能途径的效率，耗能能力越强，体系抵御地震作用的效果越好。需评估不同耗能途径的协同作用，单一耗能途径不足时，需通过优化设计强化多途径耗能效果。抗倒塌能力研究需通过极端地震荷载模拟，测试体系在接近破坏极限时的性能，判断体系是否具备足够的抗倒塌储备，明确破坏极限状态的特征，确保建筑在极端地震下不易发生倒塌。需考察体系整体稳定性，避免局部构件失效引发整体倒塌连锁反应。

2.4 耐久性性能分析

材料老化分析需将复合模壳材料置于不同环境条件下，如高湿度、极端温度、腐蚀介质环境，观察材料外观、强度、弹性模量等性能随时间的变化，总结老化规律，评估材料在长期使用中的稳定性。需对比不同环境条件下的老化速率差异，为不同地域的结构材料选型提供依据。界面性能衰减探究需重点关注模壳与混凝土、连接件与构件间的界面，监测界面粘结强度、滑移量等性能的长期变化，分析界面失效的机制，如粘结层老

化、腐蚀导致的界面脱离，避免界面失效影响体系整体性能。需研究界面防护措施的有效性，合理的防护可延缓界面性能衰减速度。结构性能劣化研究需综合考虑材料老化与界面性能衰减，监测长期环境作用下体系承载能力、变形性能的劣化趋势，为结构使用寿命评估与维护方案制定提供依据。需建立性能劣化与使用时间的关联关系，便于提前预判结构性能变化，及时开展维护工作。

3 影响装配式复合模壳剪力墙体系结构性能的核心因素

3.1 材料特性影响

复合模壳材料的力学性能直接关乎体系整体表现，其强度决定模壳能否承受施工与使用阶段的荷载，避免过早出现开裂或破损；弹性模量影响模壳与混凝土的变形协调性，若两者弹性模量差异过大，易在受力时产生附加应力，降低体系整体承载能力；韧性则决定模壳在遭遇冲击或振动荷载时的抗裂与抗破坏能力，韧性不足可能导致模壳出现脆性断裂。混凝土强度等级越高，剪力墙构件的抗压、抗剪承载力越强，可更好抵御竖向与水平荷载；骨料特性同样关键，骨料的强度、级配与形状会影响混凝土的密实度与界面粘结性能，进而作用于剪力墙构件的承载与变形性能，劣质骨料可能导致混凝土内部出现孔隙，降低构件力学性能。连接件材料的强度与刚度需与体系整体性能匹配，强度不足易导致连接失效，刚度不足则会削弱体系协同工作能力；抗疲劳性能决定连接件在长期反复荷载作用下的稳定性，抗疲劳性能差可能导致连接件逐渐损坏，影响体系长期使用安全。

3.2 构造设计影响

模壳截面形式需结合受力需求设计，中空或蜂窝状截面可在减重的同时保障力学性能，不合理截面形式可能导致应力集中；壁厚过薄会降低模壳承载能力，过厚则增加结构自重，需精准控制；开孔布局若未避开受力关键区域，可能削弱模壳局部强度，影响体系整体受力与变形。剪力墙构件高宽比过大会降低其抗剪性能，易出现剪切破坏；边缘构件设计需强化构件端部受力，若边缘构件配筋不足或截面过小，会削弱剪力墙的抗弯与抗剪能力，影响整体承载表现。节点连接方式需适配体系受力特点，螺栓连接需保证螺栓强度与拧紧度，灌浆连接需确保灌浆料饱满度与强度，连接方式不当或构造细节缺失会降低节点刚度，影响体系整体稳定性，甚至导致节点成为受力薄弱部位。

3.3 施工工艺影响

预制构件生产精度对装配质量至关重要，尺寸偏差过大会导致构件装配时无法精准对接，出现缝隙或受力

错位，影响结构性能；表面平整度不足会增加装配难度，还可能在接缝处产生应力集中。现场装配时，构件定位精度需严格控制，定位偏差会改变体系受力状态，导致部分构件承担额外荷载；连接节点施工质量直接影响协同受力效果，如螺栓未拧紧、灌浆不饱满等问题，会削弱节点连接强度，降低体系整体承载能力^[3]。混凝土浇筑质量需重点把控，密实度不足会使剪力墙构件内部存在空洞，降低构件强度与耐久性；养护条件不当会影响混凝土强度发展，养护不及时或养护环境不适宜，可能导致混凝土出现裂缝，削弱剪力墙构件力学性能，进而影响体系整体表现。

4 装配式复合模壳剪力墙体系结构性能优化方向

4.1 材料优化

研发高性能复合模壳材料需结合体系受力与环境需求，通过在基材中掺入高性能纤维或改性剂，提升材料强度与弹性模量，使其更好适配混凝土的力学特性，减少变形不协调问题；同时加入抗老化、抗腐蚀成分，增强材料在复杂环境下的耐久性，延长模壳使用寿命。优化混凝土配合比需针对模壳材料特性调整组分，选用粒径适宜的骨料并改善水泥浆体性能，增强混凝土与模壳材料的界面粘结强度，避免受力时出现界面剥离现象，提升体系整体协同工作能力。改进连接件材料需选用高强度合金或复合材料，通过材料成分调整与热处理工艺，提高连接件的承载能力与抗疲劳性能；对连接件表面进行防腐涂层处理，增强其抗环境侵蚀能力，避免长期使用中因腐蚀导致连接失效，保障体系长期稳定性。

4.2 构造优化

优化模壳结构形式与尺寸参数需结合力学模拟分析，调整中空或蜂窝状截面的孔径、壁厚分布，使应力更均匀分布，减少局部应力集中；根据不同建筑高度与荷载需求，精准设计模壳尺寸，在保证力学性能的同时控制自重，提升体系整体受力合理性。改进节点连接构造需创新连接方式，如在螺栓连接中增加弹性垫片以提升延性，在灌浆连接中优化灌浆通道设计确保灌浆饱满；通过增加节点配筋或设置加强肋，增强节点刚度与延性，优化力在节点处的传递路径，避免节点成为受力

薄弱环节。优化剪力墙构件边缘构件设计需根据抗震等级调整边缘构件的截面尺寸与配筋量，强化构件端部的抗剪与抗弯能力；合理设置暗梁、暗柱等加强构造，提升剪力墙在水平荷载作用下的抗剪与抗震性能，减少构件发生剪切破坏的风险。

4.3 工艺优化

优化预制构件生产工艺需引入自动化生产设备，如数控切割、精准浇筑系统，减少人为操作误差，提高构件尺寸精度与表面平整度；建立完善的生产质量管控流程，对模壳加工、钢筋布设、混凝土浇筑等环节进行全程监测，确保构件质量稳定性，降低不合格品率。改进现场装配工艺需采用高精度定位仪器，如激光定位仪，提升构件安装定位精度，减少装配偏差；规范连接节点施工流程，明确螺栓拧紧力矩、灌浆料养护时间等关键参数，加强施工过程中的质量检查，确保连接节点施工质量达标。完善混凝土浇筑与养护工艺需优化浇筑顺序与振捣方式，保证混凝土密实度，避免内部出现空洞；根据环境温度与湿度调整养护方案，采用覆盖保湿、恒温养护等措施，确保混凝土强度按设计要求发展，避免因养护不当导致构件力学性能下降，保障体系整体结构性能。

结束语

装配式复合模壳剪力墙体系在结构性能与工业化适配性上具备显著优势，其基础认知、性能分析、影响因素与优化方向的研究，为体系完善提供清晰路径。通过材料、构造、工艺优化，可进一步提升体系承载、抗震与耐久性，更好适配不同建筑需求。未来，随着技术持续完善，该体系将在建筑工业化中发挥更大作用，为实现建筑行业高效、绿色、高质量发展提供有力技术支撑。

参考文献

- [1]符宇欣,王凯,李伟兴.装配式复合模壳剪力墙体系结构性能分析[J].建筑结构,2024,54(12):118-124.
- [2]穆翠玲,王文俊,陈存恩.框剪结构抗震剪力墙数量的优化准则证明[J].世界地震工程,2023(1):154-157.
- [3]杨帅.装配式混凝土剪力墙结构节点连接形式及其承载力研究[J].山西建筑,2020,46(04):48-49.