

DOI: 10.7672/sgjs2025220079

箱模-剪力墙混凝土模块化建筑施工技术^{*}

刘鹏远¹, 朱怀涛¹, 饶少华¹, 段学刚², 李泽乐¹, 秦 飞², 李振兴¹, 周会垚²

(1. 深圳市安居集团有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 深圳市福田安居有限公司, 广东 深圳 518000)

[摘要]以箱模-剪力墙混凝土模块化建筑为研究对象, 基于体系构造特征推演单个模块吊装与多个模块拼装施工流程。通过数值模拟分析了墙模在螺栓对拉过程中的应力与变形, 揭示了墙模潜在的开裂风险。研究结果表明: 螺栓对拉时, 墙模会呈现向模块外侧凸起的弯曲变形, 变形分布类似双向板变形。轻质隔墙发挥了墙模嵌固端作用, 墙模拉应力与剪应力最大值均出现在轻质隔墙与墙模交接处, 交接处存在较大的开裂风险。考虑墙模开裂机理, 提出了控制对拉螺栓预紧力、优化背楞构造等施工优化建议, 并通过现场试验验证其有效性。

[关键词]模块化; 箱模; 有限元分析; 连接构造; 施工技术**[中图分类号]** TU756.4**[文献标识码]** A**[文章编号]** 2097-0897(2025)22-0079-05

Construction Technology of Box Formwork Shear Wall Concrete Modular Building

LIU Pengyuan¹, ZHU Huaitao¹, RAO Shaohua¹, DUAN Xuegang², LI Zele¹, QIN Fei²,
LI Zhenxing¹, ZHOU Huiyao²

(1. Shenzhen Public Housing Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China;

2. Shenzhen Futian Public Housing Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: Taking the box formwork shear wall concrete modular buildings as the research object, this paper deeply analyzes its structural characteristics and deduces the construction process of single module hoisting and multiple module assembly based on the characteristics of system construction. The stress characteristics and deformation distribution of the wall formwork during bolt tension has been analyzed through conceptual analysis and finite element method, revealing the potential cracking risk of the wall formwork. The results indicate that, when the bolts are pulled together, the wall formwork will exhibit a bending deformation that protrudes towards the outside of the module, with a deformation distribution similar to that of a two-way plate. The lightweight partition wall plays a role in the embedded end of the wall formwork, and the maximum tensile and shear stresses of the wall formwork occur at the junction of the lightweight partition wall and the wall formwork, which poses a significant risk of cracking. Considering the cracking mechanism of wall formwork, construction optimization suggestions such as controlling the pre tightening force of tension bolts and optimizing the back rib structure have been proposed, and their effectiveness has been verified through on-site tests.

Keywords: modularization; box formwork; finite element analysis; connection details; construction

0 引言

模块化建筑是由在工厂制造完成、具有基本使用功能的建筑空间模块通过现场装配形成整体的新型建筑形式。模块化建筑是现阶段集成度最高的装配式建筑形式^[1-5], 逐渐成为推进建筑业高质

量发展的新载体。模块与结构主体的连接节点直接影响结构整体抗震性能, 闫清峰等^[6]聚焦模块连接节点抗震性能开展试验研究, 模块自身构造及节点连接构造与常规项目有较大差异, 对结构设计方法及抗震性能均会产生影响。杨浩文等^[7]梳理国内外有关混凝土模块化建筑抗震性能研究现状, 探讨了混凝土模块化建筑特点及不同连接方式。孟辉^[8]针对混凝土模块的吊装进行试验研究, 形成了

^{*} 国家重点研发计划(2023YFC3806605)

[作者简介] 刘鹏远, 博士, 高级工程师, E-mail: lpyhit@hotmail.com

[收稿日期] 2024-10-27

模块无偏斜吊装方法及安装精度控制技术。目前对模块化建筑施工方面的研究尚不系统,本文结合项目实施经验,针对箱模-剪力墙混凝土模块化建筑,研究单模块吊装方法及多模块拼装方法,并结合有限元分析提出施工优化建议。

1 箱模-剪力墙体系特征与连接构造

1.1 基本特征

箱模-剪力墙混凝土模块化建筑体系是由箱模式模块单元与现浇混凝土剪力墙组成的建筑体系,如图 1 所示。箱模式模块单元是在工厂预制完成、包含模壳板、顶板、底板、轻质墙板的标准化建筑空间模块,如图 2 所示。箱模式模块单元通常在工厂预制阶段集成绝大部分的机电、给排水、精装修等部品部件,最大程度集成可集成的部品部件,减少现场施工工序,如图 3 所示。箱模式混凝土模块单元在工厂制作完成后,运输到施工现场进行精准安装就位。混凝土剪力墙、连梁、楼板及必要的现浇结构在现场浇筑,箱模式模块单元与结构通过特定构造进行连接。

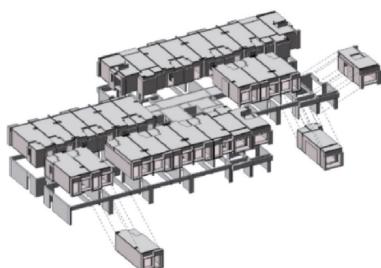


图 1 箱模-剪力墙混凝土模块化建筑

Fig. 1 Concrete modular buildings with box formwork
shear wall

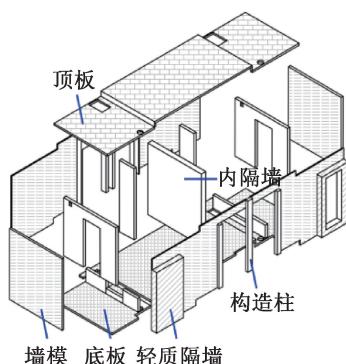
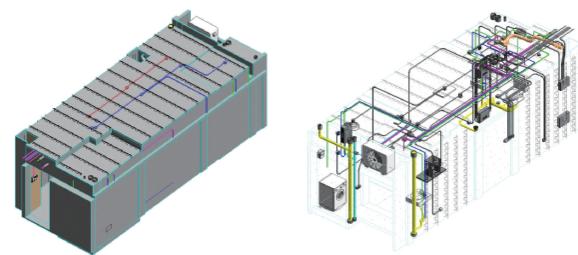


图 2 箱模式模块单元

Fig. 2 Box formwork modular unit

箱模-剪力墙体系的结构受力体系为现浇混凝土剪力墙体系,与剪力墙结构抗震概念相同。现浇混凝土剪力墙与连梁承担结构全部竖向荷载,并在风与地震等水平作用下为结构提供必要的抗侧刚



a 模块维护结构与装修
b 模块机电管线

图 3 模块集成

Fig. 3 Modular integration

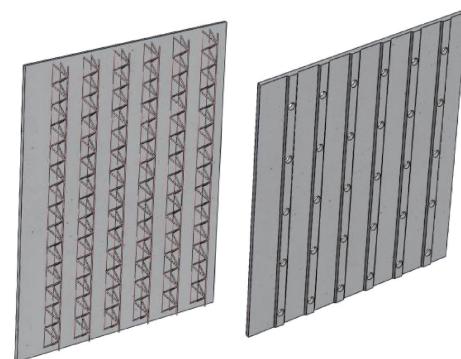
度。箱模式模块单元在工厂加工、运输、安装环节承担自身及附属部品部件的竖向荷载,在混凝土浇筑后仅作为竖向荷载作用于结构主体。

墙模、顶板、底板等混凝土部件在工厂制造阶段作为支撑体系为机电、给排水、精装修的安装提供操作面;墙模与轻质墙板在现场施工阶段作为混凝土剪力墙、连梁的施工模板,替代铝模;顶板采用叠合楼板,在工厂完成半层结构楼板,为现场楼板浇筑提供施工模板。箱模式模块单元为“工地-工厂”并行作业提供了基本条件,减少了现场模板作业,提高了现场施工效率。

1.2 连接构造

1.2.1 墙-墙连接构造

箱模-剪力墙体系在施工过程中作为混凝土剪力墙模板使用,根据 SJG 130—2023《混凝土模块化建筑技术规程》规定,墙模厚度不应小于 30mm。墙模按构造通常可分为 2 种形式:①有桁架墙模,在墙模外侧预埋桁架,并在桁架上焊接螺母,用于与铝模或墙模对拉紧固;②无桁架墙模,该墙模通常与有桁架墙模成对应用,与桁架对应位置设置厚度 ≥ 20mm 混凝土肋,在螺母对应位置开圆孔,用于与桁架对拉,如图 4 所示。



a 有桁架墙模
b 无桁架墙模

图 4 不同墙模构造形式

Fig. 4 Details of different wall formworks

一般情况下,模块与模块间剪力墙采用有桁架

墙模与无桁架墙模的双墙模对拉连接,有桁架墙模与无桁架墙模通过对拉螺栓拉结形成整体,共同作为现浇剪力墙的模板,在空腔中浇筑混凝土,如图 5 所示。其余墙面采用有桁架墙模与铝模的单墙模对拉连接,有桁架墙模与铝模通过对拉螺栓拉结形成整体,共同作为现浇剪力墙模板,后在空腔中浇筑混凝土,如图 6 所示。

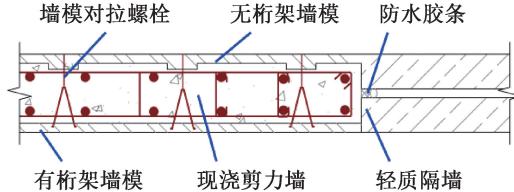


图 5 双墙模对拉连接

Fig. 5 Connection of double wall formwork

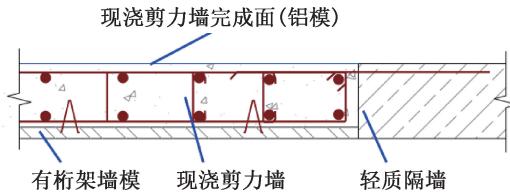


图 6 单墙模对拉连接

Fig. 6 Connection of single wall formwork

1.2.2 顶板连接构造

箱模-剪力墙体系中箱模式模块单元顶板通常按照叠合楼板预制部分生产,在施工过程中作为叠合楼板现浇部分的模板使用。叠合楼板现浇部分与剪力墙、连梁同步浇筑,如图 7 所示。

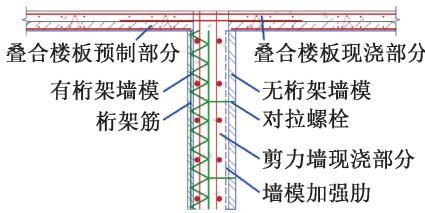


图 7 顶板连接构造

Fig. 7 Connection of top plate

1.2.3 底板连接构造

箱模-剪力墙体系中的模块单元底板不作为结构楼板参与结构受力计算,仅作为构造楼板,用于支撑地面饰面层工厂施工。模块单元底板厚度通常 $\geq 60\text{mm}$,通过 20mm 厚的坐浆层与下一层结构楼板连接,构造如图 8 所示。

1.2.4 墙模-叠合楼板生产连接构造

箱模-剪力墙体系墙模较薄,竖向浇筑难以保证混凝土浇筑密实,通常将墙模、顶板、底板水平放置浇筑成预制构件,再通过后浇带将各预制构件连接

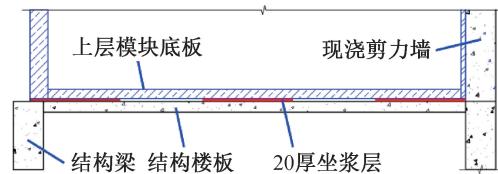


图 8 底板连接构造

Fig. 8 Connection of bottom plate

成多面体模块。墙模顶部与底部伸出弯折钢筋分别与顶面、底面锚固连接,如图 9 所示。

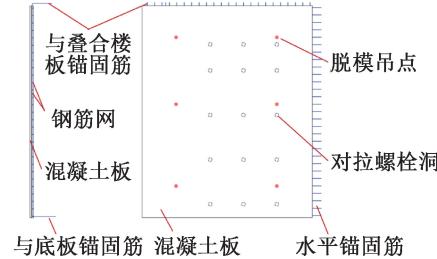


图 9 墙模构件构造

Fig. 9 Details of wall formwork component

2 箱模式模块施工流程与关键技术

2.1 基本流程

箱模剪力墙体系的结构体系为混凝土剪力墙体系,因引入箱模式模块,较常规混凝土剪力墙体系增加了模块吊装及各模块拼装相关工作,本节重点针对特殊性工作展开论述。

2.2 单模块吊装工艺

2.2.1 准备工作

1) 吊具准备。通常采用型钢制作模块吊架以适应不同尺寸的模块吊装需求,吊点下挂手动葫芦或电动葫芦,吊装过程中调节并保持模块整体平衡,如图 10 所示。



图 10 吊架

Fig. 10 Lifting frame

2) 模块准备。模块进场须扫描二维码,通过智慧平台明确其专有安装位置,检查出厂资料,回弹检测箱体混凝土强度,并对箱体尺寸、吊环等进行抽检。

3) 楼面准备。依据各层控制轴线放出本层模块的底板轮廓线和模块控制线。在结构楼板上采

用硬质橡胶垫片找平, 垫块应重点布置在较厚墙体底部, 其余部位均匀布置。沿着模块位置线内退 50mm, 敷设宽 $\geq 50\text{mm}$ 、30mm 高的水泥砂浆带。

2.2.2 吊运与精准定位

1) 模块绑钩调平工作。通过手拉或电动葫芦将模块各吊点连接至专用吊架, 保证模块吊环、葫芦吊链、吊架吊孔处于同一垂线, 保证吊链处于拉紧状态。将模块提升 $\leq 1\text{m}$ 进行试吊, 检查各连接部位是否可靠。若模块试吊略有倾斜, 需调节葫芦至模块平衡后方可正式起吊。

2) 模块引导就位。模块降落时通过缆风绳调整模块整体姿态。降落至距离楼面约 0.5m 高时停止降落, 操作人员分别稳住模块四角, 根据楼面模块控制线缓慢引导模块就位, 完成微调工作。参照《混凝土模块化建筑技术规程》, 检查模块安装平面位置、水平度、垂直度是否达标, 验收合格后方可摘钩。

2.3 多模块拼装工艺

与常规剪力墙结构不同, 单个模块吊装完成后, 须完成墙模侧钢筋绑扎等工作, 方可进行相邻模块安装, 如图 11 所示。首先应先安装有桁架模块, 随后开展剪力墙钢筋绑扎工作。由于桁架筋的存在, 靠近桁架的 1 层水平分布钢筋需穿过桁架筋进行绑扎。完成上述工作后再安装无桁架模块, 并与有桁架模块进行对拉, 形成模板体系。为保障墙模受力均匀, 须在无桁架墙面合理设置背楞。模块拼装完成后, 完成外侧铝模安装、梁板钢筋绑扎, 最终完成混凝土浇筑工作。

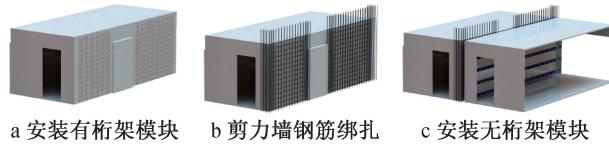


图 11 模块拼装

Fig. 11 Module assembly

同一楼层中模块安装顺序受模块桁架筋位置决定, 应在设计阶段引入 DfMA 理念, 基于楼层模块安装流水确定模块形式及桁架筋细部构造。

3 施工阶段墙模受力性能

与常规结构项目相比, 箱模-剪力墙体系施工荷载最大的不同在于墙模受力情况。墙模作为混凝土剪力墙模板使用, 通过合理布设对拉螺栓, 保证混凝土浇筑过程中不会出现胀模现象。参照常规铝模安装, 通常会在墙模处布设背楞进行对拉, 如图 12 所示。

相比传统铝模, 混凝土墙模延性较差。采用混

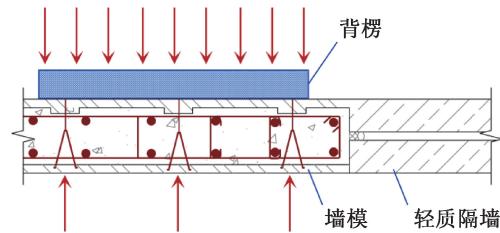


图 12 施工过程受力

Fig. 12 Force in construction process

凝土墙模作为剪力墙模板, 墙模在施工过程中存在潜在开裂风险, 原因如下:①墙模与轻质隔墙交接处刚度突变显著, 易发生应力集中;②两墙模之间布设限位装置难, 若对拉螺栓预紧力过大, 可能会导致墙模变形;③在对拉螺栓预紧力作用下, 背楞与轻质隔墙可能对墙模产生剪切作用, 墙模应力增大。

4 有限元分析

选取典型项目的无桁架模块进行有限元分析, 量化模块在施工过程的受力特性。模块简化为长方体, 开设门窗洞口。模块长 8m, 最大宽度 3.59m, 高 2.91m。待分析墙面中部有 1.5m 宽的轻质隔墙, 两侧墙模分别宽 3.7, 2.8m。墙模厚度为 30mm, 混凝土肋部的凸起厚度为 20mm, 轻质隔墙厚 120mm, 如图 13 所示。模块顶板、底板及轻质隔墙采用 C30 混凝土, 墙模采用 C60 混凝土。

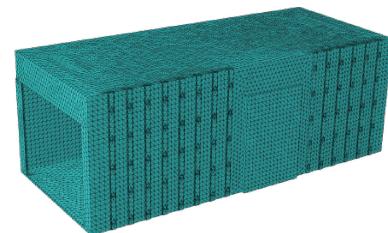


图 13 有限元模型

Fig. 13 Finite element model

为防止墙模在施工过程中开裂, 通常在墙模内布设直径 6mm 的双向单层分布钢筋。在 30mm 厚的墙模中, 分布钢筋通常布设于墙模厚度方向中性轴附近, 分布钢筋对混凝土抗裂贡献不大, 在有限元分析中忽略钢筋对混凝土的抗开裂贡献。现场施工过程中, 施工员通过人工或电动扳手对各对拉螺栓进行紧固, 各对拉螺栓施加的预紧力相近, 故在有限元分析中对各对拉孔施加相同荷载。采用荷载控制进行有限元分析, 分析模块在对拉过程中的应力与变形分布, 如图 14, 15 所示。

由图 14 可知, 螺栓对拉会使墙模发生弯曲变形, 随着对拉螺栓预紧力不断增加, 模块较大拉应

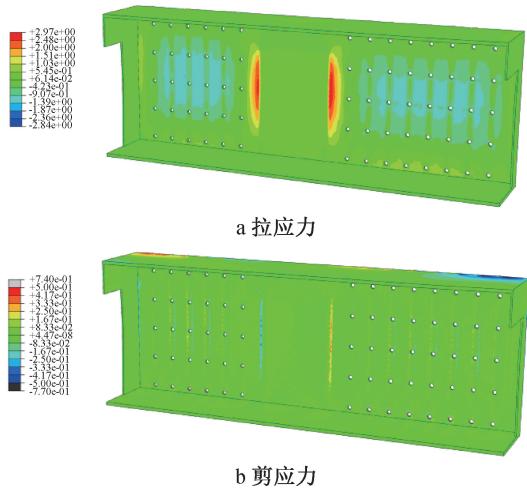


图 14 应力分布(单位:MPa)

Fig. 14 Stress distribution (unit: MPa)

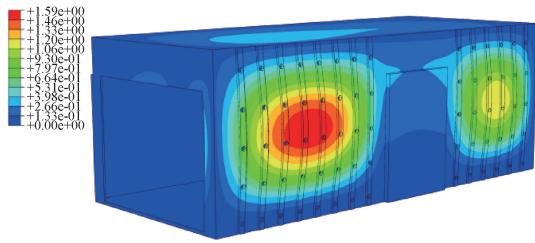


图 15 变形分布(单位:mm)

Fig. 15 Deformation distribution (unit:mm)

力出现在轻质隔墙与墙模交接处,楼层中间高度位置的应力最大,向底部逐渐减小。模块内部的拉应力会率先超过 C60 混凝土抗拉强度(2.85MPa),导致墙模混凝土受拉开裂;墙模与底板、顶板交接处拉应力为 1.0~1.5MPa,为拉应力较大区域和混凝土开裂风险区域。剪应力方面,轻质隔墙与墙模交接处的剪应力明显高于其他部位,最大剪应力约为 0.5MPa,其余墙模剪应力基本为 0。这是因为模型中轻质隔墙厚度为墙模的 4 倍,轻质隔墙平面外刚度约为墙模的 200 倍,轻质隔墙对墙模产生类似嵌固端的约束作用,轻质隔墙与墙模交接处有剪切效应。

由图 15 可知,在对拉螺栓预紧力作用下,墙模向模块外侧凸起,变形分布类似双向板变形,墙模发生弯曲变形。墙模宽度越长,墙模平面外变形越大。在墙模拉应力超过混凝土抗拉强度(2.85MPa)时,墙模开始出现裂缝,此时 3.7m 宽墙模最大变形为 1.59mm,2.8m 宽墙模最大变形为 1.18mm。根据《混凝土模块化建筑技术规程》,模块内墙面平整度 $\leq 4\text{mm}$,墙模刚出现裂缝时的平面外变形相对较小,墙模平面外变形对墙面平整度影响相对可控。随着荷载增大,变形将持续增大,可能影响墙面平

整度。

综上所述,随着模块间对拉螺栓预紧力不断增大,墙模会发生向模块外侧的平面外变形。轻质隔墙刚度相对较大,发挥嵌固端作用,对拉过程对墙模施加剪切作用。墙模在对拉过程中,墙模拉应力与剪应力最大值均出现在轻质隔墙与墙模交接处,交接处存在墙模混凝土开裂的风险。

5 墙模开裂风险控制措施

箱模-剪力墙体系对拉螺栓可能会导致墙模开裂,对此应采取针对性施工措施。一方面,要控制对拉螺栓预紧力,尽量减小墙模面外变形,建议采用扭矩扳手紧固对拉螺栓,通过现场试验方式确定对拉螺栓预紧力控制值。另一方面,要优化背楞构造,削弱轻质隔墙与墙模交接处的刚度突变,建议增长背楞,使背楞横跨轻质隔墙与墙模交接处,通过在交接处增加背楞刚度以削弱交接处两侧刚度突变。将本方法应用于在建箱模-剪力墙混凝土模块化建筑项目中,可有效避免混凝土墙模施工荷载下的开裂风险,如图 16 所示。



图 16 墙模施工

Fig. 16 Wall formwork construction

6 结语

本文以箱模-剪力墙混凝土模块化建筑为研究对象,深入剖析其构造特点。结合项目实操经验,从准备工作、吊运工作和吊运验收环节重点论述了单个模块吊装注意事项。结合模块的特殊构造,推演了多个模块拼装流程,阐明了模块安装顺序与模块构造形式的联系。

针对模块拼装过程中混凝土墙模的潜在开裂风险,开展有限元分析,并优化了施工措施。结合墙面开裂风险的受力概念与分析结果,建议采取控制对拉螺栓预紧力、优化背楞构造的方式等措施控制墙模变形与应力,避免开裂。

参考文献:

- [1] 王翌飞.香港组装合成建筑法(MiC)发展研究及借鉴[J].住宅与房地产,2024(17):4-11.
- WANG Y F. Research and reference on the development of MiC in Hong Kong [J]. Housing and real estate, 2024(17):4-11.

(下转第 98 页)

流动性和早期强度,预应力灌浆的施工效率可提升30%以上,同时确保灌浆质量稳定可靠。

3)研发了预应力孔道摩擦系数精确测定方法,简化摩擦试验流程,减少了试验数据的偏差,测定结果更接近实际工况,所有试验钢束摩擦系数均<0.05,与内安全壳强度分析采用的数值相同。

参考文献:

- [1] 王祥德.田湾核电站安全壳预应力管道施工技术[J].山西建筑,2021,47(1):93-95.
- [2] WANG X D. On prestressed pipeline construction technique for containment of Tianwan Nuclear Power Plant [J]. Shanxi architecture, 2021,47(1):93-95.
- [3] 张大魏.某核电站反应堆双层安全壳结构施工关键技术研究[D].南京:东南大学,2019.
- [4] ZHANG D W. Research on key construction technology of double containment structure for a nuclear power plant reactor [D]. Nanjing:Southeast University,2019.
- [5] 张波,彭建兵.核电站安全壳1200t级预应力综合施工技术[J].江苏建筑,2020(4):9-11.
- [6] ZHANG B,PENG J B. Comprehensive construction technology of 1200ton prestressing concrete for nuclear power plant containment [J]. Jiangsu construction, 2020(4):9-11.
- [7] 段宝平,雷学玲,管基海,等.环状立体双向双螺旋无粘结预应力空心板车道关键施工技术[J].施工技术,2020,49(16):55-58,65.
- [8] DUAN B P, LEI X L, GUAN J H, et al. Key construction technology of circular solid bidirectional double helix unbonded prestressed hollow-slab carriageway[J]. Construction technology, 2020,49(16):55-58,65.
- [9] 蔡彪,刘军,李斌,等.核电站大尺寸薄壁钢衬里底板施工技

(上接第 83 页)

- [1] 马欣伯,娄霓,冯仕章,等.我国模块建筑的发展与应用[J].建设科技,2023(12):12-16.
- [2] MA X B,LOU N,FENG S Z,et al. Development and application of module building in country [J]. Construction science and technology, 2023(12):12-16.
- [3] 岳清瑞,吴朝昀,刘晓刚,等.多高层模块化结构及建造技术研究进展与未来趋势[J].建筑结构学报,2024,45(8):1-19.
- [4] YUE Q R,WU Z Y,LIU X G, et al. Progress and future trends in development of multi-story and high-rise modular structures and construction technology[J]. Journal of building structures, 2024, 45(8):1-19.
- [5] 赵春婷,朱宏利,潘磊.钢框架模块化建筑适应性设计实践[J].城市建筑空间,2024,31(10):118-120.
- [6] ZHAO C T,ZHU H L,PAN L. Practice of adaptive design for steel frame modular building[J]. Urban architecture space, 2024, 31(10):118-120.
- [7] 陈晓旭,陈兆荣,陈戊荣,等.模块化薄壁轻钢建筑研究——以集装箱建筑为例[J].城市建筑空间,2023,30(8):120-122.

术[J].施工技术(中英文),2022,51(22):67-71.

CAI B,LIU J,LI B,et al. Construction technology on bottom plate of thin steel liner with large dimension in nuclear power plants [J]. Construction technology, 2022,51(22):67-71.

- [8] 汪虎,邹少俊,张海方.华龙一号核电站内层安全壳穹顶施工技术[J].施工技术(中英文),2022,51(9):130-134.
- [9] WANG H,ZOU S J,ZHANG H F. Construction technology of inner containment vessel dome for HPR1000 nuclear power plant [J]. Construction technology, 2022,51(9):130-134.
- [10] 孙乐.EPR核电站内安全壳穹顶施工稳定性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [11] SUN L. Construction stability analysis of inner containment dome of the EPR[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] 王洋洋.基础筏板大体积混凝土温度场分析及施工控制[J].施工技术(中英文),2023,52(22):111-114,120.
- [13] WANG Y Y. Temperature field analysis and construction control for mass concrete of foundation raft[J]. Construction technology, 2023,52(22):111-114,120.
- [14] 杜彦东,张季超,李瑞祥,等.明挖隧道衬砌大体积混凝土水化热温控技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(24):74-77.
- [15] DU Y D,ZHANG J C,LI R X,et al. Hydration heat temperature control technology of mass concrete lining of open-cut tunnel[J]. Construction technology, 2024,53(24):74-77.
- [16] 李志鹏,罗奇星,韩庆华,等.大体积混凝土墙水化放热温度场分析[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2023,56(8):878-885.
- [17] LI Z P,LUO Q X,HAN Q H,et al. Analytical solution for the temperature field of the hydration heat in a mass concrete wall [J]. Journal of Tianjin University (science and technology), 2023,56(8):878-885.

CHEN X X,CHEN Z R,CHEN W R,et al. Modular thin-walled light steel building:taking container building as an example[J]. Urban architecture space, 2023,30(8):120-122.

- [18] 吴清峰,张纪刚,王涛,等.预制预装修模块化建筑连接节点抗震性能[J].吉林大学学报(工学版),2023,53(2):505-514.
- [19] YAN Q F,ZHANG J G,WANG T,et al. Seismic performance of connection joints between prefabricated prefinished volumetric construction [J]. Journal of Jilin University (engineering and technology edition), 2023,53(2):505-514.
- [20] 杨浩文,薛伟辰,江佳斐.模块化混凝土结构抗震性能研究进展[J].施工技术(中英文),2024,53(6):1-8,71.
- [21] YANG H W,XUE W C,JIANG J F. Research progress on seismic performance of modular concrete structures [J]. Construction technology, 2024,53(6):1-8,71.
- [22] 孟辉.混凝土模块化集成建筑吊装系统设计及安装关键技术研究[J].广东土木与建筑,2022,29(3):58-60,74.
- [23] MENG H. Design of concrete modular integrated building hoisting system and the key technology of installation [J]. Guangdong architecture civil engineering, 2022,29(3):58-60,74.