引用格式：赵楠，汪东卓，许庆，等. 钢结构幼儿园抗震和超低能耗综合性能提升设计方法[J]. 工业建筑，2025，55(8)：141-146. ZHAO Nan，WANG Dongzhuo，XU Qing，et al. A Comprehensive Performance Improvement Design Method for a Steel Structure Kindergarten's Seismic Resistance and Ultra-Low Energy Consumption[J]. Industrial Construction，2025，55(8)：141-146 (in Chinese). DOI：10. 3724/j. gyjzG24110102

钢结构幼儿园抗震和超低能耗综合性能提升设计方法*

赵　楠[1]　汪东卓[2]　许　庆[3,4]　徐晓达[3]

（1. 基准方中建筑设计股份有限公司，成都　610017；2. 中建二局安装工程有限公司，北京　100032；3. 中冶建筑研究总院有限公司，北京　100088；4. 清华大学土木工程系，北京　100084）

摘　要　鉴于幼儿园建筑的高安全性和高舒适性，抗震性能应提升到“中震不坏”的水平，并应适当考虑罕遇地震下的维修便利性。结合北京某钢结构超低能耗幼儿园项目，采用高性能混凝土钢筋桁架板承重体系，提升强度、隔热防水和耐久性能，抗震设计中采用黏滞阻尼器，通过优化消能部件的布置，使双主轴方向变形和附加阻尼接近，主体结构达到“中震不坏”“大震可修”标准。本项目为超低能耗建筑，常规围护系统的设计方法与变形能力不匹配，故采用玄武岩复合纤维一体化外墙板产品，其自重是常规外墙体系的30%，强度可达到200~400 MPa，可以适应1/100的层间变形，与建筑抗震性能匹配，保温性能满足超低能耗建筑的要求，实现设防地震正常使用的标准。同时探索了以抗震性能提升为主导因素、舒适性能提升相适应的双目标综合设计方法。

关键词　装配式建筑；减震设计；超低能耗；围护系统；性能

A Comprehensive Performance Improvement Design Method for a Steel Structure Kindergarten's Seismic Resistance and Ultra-Low Energy Consumption

ZHAO Nan[1]　WANG Dongzhuo[2]　XU Qing[3,4]　XU Xiaoda[3]

(1. *JZFZ Architectural Design Co. , Ltd. , Chengdu* 610017, *China*; 2. *China Construction Second Bureau Installation Engineering Co. , Ltd. , Beijing* 100032, *China*; 3. *Central Research Institute of Building and Construction Co. , Ltd. , MCC Group*, *Beijing* 100088, *China*; 4. *Department of Civil Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*)

Abstract: Given the critical requirements for both safety and comfort in kindergarten buildings, the seismic performance has been enhanced to ensure the structure remains undamaged under a moderate earthquake, while also incorporating design features for easier repair following a major seismic event. Based on a steel-structural ultra-low energy consumption kindergarten project in Beijing, a high-performance concrete steel bar truss floor system was adopted to enhance structural strength, thermal insulation, waterproofing, and durability. For seismic design, viscous dampers were incorporated. Through optimized layout of energy dissipation components, the stiffness and additional damping ratios were similar in both principal directions. The main structure achieved the performance objective of remaining undamaged under moderate earthquakes and being repairable following major earthquakes. As an ultra-low energy consumption building, the project required that the design method for its conventional envelope system be compatible with the required deformation capacity. To address this, basalt composite fiber-integrated exterior wall panels were employed. They offered a mere 30% of the weight of conventional systems with a compressive strength ranging from 200 to 400 MPa. They accommodated an inter-story drift ratio of 1/100, matching the seismic performance requirements of the building. Their thermal insulation

* 国家自然科学基金项目(52378320)；北京市科学技术协会优秀青年工程师创新工作室项目(2024-A)。

第一作者：赵楠，工学硕士，教授级高级工程师，主要从事装配式建筑技术研究，biadzm@126. com。

通信作者：许庆，工学硕士，正高级工程师，主要从事预应力结构性能评价研究，a_qing01@foxmail. com。

收稿日期：2024-11-01

© 2025 工业建筑

performance also met the requirements of ultra-low energy consumption buildings, enabling the structure to remain functional and undamaged under moderate earthquakes. This paper investigates a dual-objective integrated design approach where the enhancement of seismic performance serves as the primary driver, aligned with the improvement of comfort performance.

Keywords: prefabricated building; seismic design; ultra-low energy consumption; building envelope; performance

0　引　言

幼儿园作为儿童成长的重要场所,其建筑设计不仅要满足基本的教育和保育功能,更应积极响应国家对建筑性能提升的要求,特别是在结构安全和可持续发展方面。

在工程实践中,建筑安全与节能设计方法虽全面,但缺乏综合协调。如抗震性能提升导致主体结构变形增加,对保温围护系统提出更高要求。因此,需发展一种综合设计方法,以适应这种变化,实现建筑性能的整体优化。

自2016年,北京市率先在全国推出一系列高标准建设项目,包括住宅、教育建筑等,集成了高装配率、绿色三星建筑、健康建筑、超低能耗建筑等多项要求,为提升安全、工业化、健康及可持续发展的综合建筑性能做出了表率。本文通过重点介绍北京市高标准幼儿园项目在抗震性能和超低能耗性能提升的实践,为今后类似项目提供参考。

《建筑工程抗震管理条例》的颁布实施,强调了幼儿园等关键建筑类型提高抗震能力的重要性,在高烈度地区确保在设防地震发生时建筑能够维持正常使用[1],体现了国家对幼儿保护的重视。

在双碳战略的背景下,绿色建筑和超低能耗建筑的重要性愈发凸显。建筑领域的节能减碳及可持续发展成为实现这一目标的关键之一[2],建筑在满足人类健康需求的同时,也要注意与自然环境的和谐共生[3],以及为未来可持续发展留下足够的空间和资源。超低能耗建筑通过高效的围护结构保温、高性能门窗、新风热回收系统等技术措施[4],大幅降低建筑能耗,减少对环境的影响。国家和北京市公共建筑超低能耗设计标准的执行[5],推动了建筑能效的提升,实现了建筑可持续发展,为儿童创造一个更加绿色的环境。

为适应建筑综合性能提升的需求,新材料和新工艺的应用也是重要途径。如高延性高强结构体系和轻质高强高延性的围护系统的使用,不仅提高了结构的承载力和延性,还有助于适应主体结构抗震变形的需求[6]。本工程运用了"四新(新材料、新设备、新工艺、新技术)"技术产品,实现了设防地震下超低能耗的建筑实践[7]。

1　工程概况

北京市某幼儿园建筑系北京市高标准商品房建设项目的配套工程,对抗震、健康及节能等性能要求均比常规项目有较大提升。地址位于北京市大兴区大兴新城核心区。总建筑面积4560 m^2,地上三层,地下一层,总建筑高度14.85 m。学生总规模为12个班。项目效果如图1所示。



图1　幼儿园效果

Fig. 1　Rendering of the kindergarten

抗震设防烈度为8度,设计地震分组为第二组,建筑场地类别为II类,场地特征周期0.4 s。抗震设防分类为重点设防类。气候条件属于寒冷气候地区。

本项目属于北京市高标准商品房建设工程范围,执行京政办发[2022]16号《北京市人民政府办公厅关于进一步发展装配式建筑的实施意见》及北京市住建委的相关要求,明确装配率为76%,并按北京市地方标准DB11/T 1831—2021《装配式评价标准》执行,采用装配式钢框架结构体系[8]。实施三星级绿色建筑标准,符合GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》的要求。实施健康建筑标准,符合T/ASC 02—2021《健康建筑评价标准》的要求。实

施超低能耗建筑标准，符合京建发[2018]183号《北京市超能能耗建筑示范项目技术导则》的要求。采用减震技术，符合 DB 11/2075—2022《建筑工程减隔震技术规程》的要求。

采用了高性能混凝土钢筋桁架楼承板和玄武岩纤维复合材料装配式外墙板2项高性能产品。

本文着重介绍建筑物抗震性能、节能性能综合提升的技术应用情况。

2　高性能混凝土楼承板和消能减震的应用

2.1　高性能混凝土钢筋桁架板承重体系

本项目采用西安建大装配式钢结构研究院有限公司研发的高性能混凝土钢筋桁架楼承板，是以高性能混凝土作为轻型楼板底板，配合钢筋桁架组合的新型装配式楼板[9]。其具有高强度、高性能的力学性能，高密度、高耐久的材料性能，且隔热、防水性能良好。由于密实度极高且具备自愈功能，杜绝了楼板后期开裂、渗水等问题。该结构性能极佳，经久耐用。高性能混凝土底板厚度仅为 15 mm，现场加载试验如图 2 所示，试验板在预设的无支撑施工跨度下挠度约为 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》限值的 75%，试验极限承载力大于设计值 1.2 倍，且挠度符合 GB 50010—2010 要求，没有出现分层显现，验证了高性能混凝土与后浇筑混凝土能够协同工作。



图 2　高性能混凝土楼承板试验

Fig. 2　High-performance concrete steel bar truss floor deck test

除了上述力学及耐久性能优势外，该产品在减碳方面也有明显优势。若采用普通钢筋桁架楼承板，底模材料为 0.5~1 mm 厚镀锌钢板，按照本项目的基本跨度，根据 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》复核，折合碳排放约为 24 kg/m^2，而该产品折合碳排放约为 5.7 kg/m^2，产品的减碳效果十分明显。

由此可见，该产品具备高强度、高韧性、工业化程度高、碳排放强度低等特点，有效提升了建筑使用的性能水平。

2.2　“中震不坏”“大震可修”的性能提升目标

依据国家相关规定，本项目采用减隔震技术以确保结构在设防地震作用下保持正常使用功能，实现“中震不坏”的性能标准。在三水准抗震设计方法的核心理念下，除关注多遇地震下的结构弹性响应，也对罕遇地震下的极限状态进行了量化分析，以确保结构在极端地震作用下的安全。鉴于工程的高抗震性能要求及全生命周期内的维护成本，本项目特别强调在罕遇地震作用下结构的可维修性。通过复核罕遇地震下框架梁柱的损伤情况，确保损伤控制在中度损坏程度以内，满足可修复性要求。

本项目采用黏滞型阻尼器，利用磁流体材料和阻尼器结构部件的相互作用产生阻尼力的原理设计、制作了一种速度相关型结构消能减振装置，与传统阻尼器相比，它具有激励反应快、耗能能力强、无毒、抗老化性能强等优点。黏滞型阻尼器的安装样式如图 3 所示，阻尼器平面布置如图 4 所示。

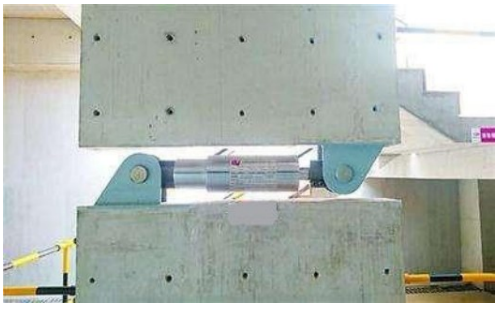


图 3　黏滞型阻尼器样式

Fig. 3　Viscous damper style diagram

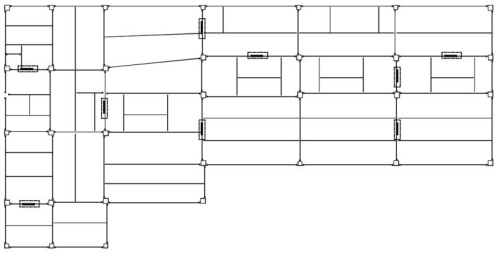


图 4　黏滞型阻尼器平面布置

Fig. 4　Plan layout of viscous dampers

黏滞型阻尼器的优点：多遇地震或风振中即进入耗能阶段，激励反应快，耗能能力强；只为结构提供耗散能量的阻尼力，不提供附加的刚度，不改变结构的自振周期，因此耗能能力强、效率高，而且不改变结构的振动频率特性；连接方式灵活多样，布置方便灵活，对建筑影响较小；性能稳定，耐久性

好;便于维修更换[10]。

通过优化布局,双主轴方向的刚度和附加阻尼基本一致,结构协调性较好。整体结构抗震性能和构件抗震性能见表1。

表1　抗震性能目标

Table 1　Seismic performance objectives

地震水准	建筑正常使用的性能目标				
	整体性能	位移角限值	竖向构件	水平构件	关键构件
多遇地震	完好	1/250	完好	完好	完好
设防地震	基本完好	1/200	基本完好	基本完好	基本完好
罕遇地震	轻度-中度损坏	1/80	中度损坏	中度损坏	轻度损坏

地震水准	建筑正常使用的结构构件性能目标				
	关键竖向构件	重要水平构件	竖向构件	水平构件	减震部件
多遇地震	抗弯弹性 抗剪弹性	抗弯弹性 抗剪弹性	抗弯弹性 抗剪弹性	抗弯弹性 抗剪弹性	抗弯弹性 抗剪弹性
设防地震	抗弯弹性 抗剪弹性	抗弯不屈服 抗剪弹性	抗弯不屈服 抗剪弹性	抗弯不屈服 抗剪弹性	抗弯弹性 抗剪弹性
罕遇地震	抗弯不屈服 抗剪不屈服	抗弯不屈服 抗剪弹性	—	—	抗弯弹性 抗剪弹性

本项目选用一种规格的黏滞型阻尼器,阻尼器设计使用年限为30年。阻尼系数为500 kN·(m/s)$^{-\alpha}$,阻尼指数为0.2,最大阻尼力为500 kN,极限位移120 mm,数量为26个。

2.3　“中震不坏”及“大震可修”量化分析

三水准下地震波输入的峰值加速度见表2。通过消能部件的优化布置,使得双主轴方向下刚度和附加阻尼比较接近[11],三水准地震动作用下的层间位移角和附加阻尼比见表3。

表2　三水准地震动下地震波峰值加速度

Table 2　Peak acceleration of seismic waves under three-level ground motions　cm/s^2

项目	多遇地震	设防地震	罕遇地震
主方向峰值加速度	70.0	200.0	400.0
次方向峰值加速度	59.5	170.0	340.0

消能部件耗能与总输入能量的比例见表4。三水准地震工况下,阻尼器工作状态正常,消耗了输入结构的地震能,展示了良好的耗能能力。

钢框梁和钢框柱在罕遇地震下均表现出良好的耗能能力,框梁的损坏程度全部在轻微~轻度损坏。框柱的损坏程度在轻度~中度损坏,其中,2层及以上的框架柱,为轻度损坏,首层框架柱柱底为轻度~中度损坏,中度损坏的框架柱数量占比约为50%。

表3　三水准地震动下层间位移角及附加阻尼比统计

Table 3　Statistics of inter-story drift ratios and added damping ratios under three-level seismic ground motions

地震水准	工况	主方向	层间位移角	附加阻尼比
多遇地震	天然波1	*X*	1/996	14.3
		Y	1/1391	13.7
	天然波2	*X*	1/622	16.7
		Y	1/750	15.4
	人工波	*X*	1/826	12.9
		Y	1/1108	13.7
设防地震	天然波1	*X*	1/287	9.5
		Y	1/223	10.3
	天然波2	*X*	1/235	8.0
		Y	1/303	10.3
	人工波	*X*	1/211	9.7
		Y	1/238	11.4
罕遇地震	天然波1	*X*	1/109	6.8
		Y	1/93	7.0
	天然波2	*X*	1/97	6.9
		Y	1/120	6.8
	人工波	*X*	1/89	7.1
		Y	1/111	7.7

表4　三水准地震动下消能部件耗能占比

Table 4　Proportion of energy dissipated by the damping components under three-level ground motions　%

项目	多遇地震	设防地震	罕遇地震
消能部件耗能/总输入能量比例	80	65	50

综上所述,黏滞型阻尼器消耗了输入结构中的大量能量,有效保护了主体构件,本项目的抗震性能相比常规建筑有了大幅度提升,达到了“中震不坏”和“大震可修”的目标。

3　适应高抗震能力的超低能耗性能提升

根据DB 11/2075—2022的规定,钢结构学校建筑在设防地震下层间位移角限值为1/200,罕遇地震下层间位移角限值为1/80,且总体性能目标是罕遇地震下适度修理可继续使用。这不仅是对主体结构构件的要求,同时要求非结构构件在设防地震下基本完好,罕遇地震下不超过中度损坏。

本项目采用超低能耗技术,其目标是适应气候特征和自然条件。通过被动式建筑设计最大幅度降低建筑供暖、空调、照明需求。通过主动技术措

施最大幅度提高能源设备与系统效率[12]；充分利用可再生能源。以最少的能源消耗提供舒适室内环境[13]，且其室内环境参数和能效指标符合北京市有关规定。超低能耗建筑的技术体系综合应用包括高效保温、高效节能门窗、高效热回收新风系统、极佳气密性、无热桥设计、可再生能源、照明节能技术、能源监测等多个维度。

建筑外围护系统不仅提供保温隔热和防水功能，在地震发生时，应减少对主体结构的冲击和损害，防止结构破坏和倒塌，保护建筑内部人员的安全和减少财产损失。超低能耗幼儿园常用的围护系统为蒸压加气混凝土墙板，根据 JGJ/T 17—2020《蒸压加气混凝土制品应用技术标准》中墙板与主体结构适应性的规定，对于钢结构和混凝土结构层间位移角分别为 1/250 和 1/500。本项目在设防地震时层间位移角为 1/211，罕遇地震时层间位移角为 1/89，抗震性能尤其是变形能力较常规建筑有较大提升，因此在超低能耗技术应用时，尤其是围护系统和材料的设计方法上，要充分适应这种情况。

3.1　玄武岩纤维复合材料装配式外墙板特性及工艺

本项目采用中国建筑西南设计研究院有限公司研发的玄武岩纤维复合材料，这是一种以无机材料为主要胶凝材料，以玄武岩纤维作为增强材料的复合材料。该材料具有超强的耐候性能，在抗老化试验中，相当于在室外约 80 年时间，仍然不掉色、不掉灰、无脱落现象。在冻融、干湿、湿热、酸碱处理、高温等条件下，材料均能保持较高强度。

玄武岩纤维复合材料的密度不大于 1.90 g/cm^3，仅为钢材的 24%，抗拉及抗弯强度在 200~400 MPa，属于轻质高强材料。经材性试验验证，龙骨及面板连接采用铰接构造连接，层间位移量可达 1/100，系统层间变形能力为 5 级。55 mm 厚空腔板系统抗风性能可达到 2.38 kPa，相当于 12 级台风。系统采用多道防水胶条的构造防水方式，局部耐候密封胶封堵。在强压下淋水渗漏，系统水密性能可达到 3 级。外墙板构造计权隔声量+交通噪声频谱修正量 R_w+C_{tr} 为 51 dB，远超过 GB 50118—2010《民用建筑隔声设计规范》中学校外墙 $R_w+C_{tr}\geq45$ dB 的要求。

玄武岩纤维复合板具有超强保温隔热的性能，其导热系数为 0.41 W/(m·K)，与木材接近，大约为玻璃导热系数的 37%，铝板导热系数的 0.17%，非常适合应用在超低能耗建筑中。整体外墙板的平均传热系数[14]为 0.138 W/(m^2·K)，低于 0.22 W/(m^2·K)的设计需求值，具体节能情况见表 5。

表 5　各工况下内表面最高温度

Table 5　Maximum inner surface temperatures under various working conditions　℃

位置	空调工况	限值要求	自然通风工况	限值要求
东向外墙	26.32	28.00	41.77	42.00
南向外墙	26.38		41.83	
西向外墙	26.44		41.84	
北向外墙	26.29		41.73	

经试验测定，该产品的甲醛释放量达到 E_0 级标准，其他重金属含量也远低于国家标准。

本项目外墙部位构造工艺：面板采用 55 mm 厚玄武岩纤维复合保温装饰一体板，纤维复合板空腔内填充玻纤棉毡。面板后侧采用岩棉钉、卡件等固定方式复合 250 mm 厚玻纤棉保温板。保温棉外侧包裹防水隔汽膜。室内侧采用纤维增强水泥板封修（室内装饰可根据内装设计需求采用粉刷喷漆或其他装饰处理）。

本项目门窗洞口构造工艺：纤维复合板及保温玻纤棉等构件通过背附钢架组成 2 m 长左右的横向单元板块。根据建筑造型需要，门窗洞口均采用 3 mm 铝单板与纤维复合材料板块做收边处理[15]。为达到更好的节能效果，铝断桥节能窗窗框下侧垫 40 mm 厚通长高密度硬质聚氨酯隔热垫块；为实现建筑良好的气密性、水密性，窗框四周内侧粘贴防水隔汽膜，外侧粘贴防水透汽膜[16]。

3.2　高性能围护结构整体性能

本项目的外围护结构性能参数见表 6。

外窗安装方式采用内嵌式企口安装，窗框外皮和

表 6　围护结构性能参数

Table 6　Performance parameters of the building envelope

部品部件	节能做法	传热系数/(W·m^{-2}·K^{-1})	
		设计值	标准限值
外墙	250 mm 玄武岩纤维板	0.138	0.10~0.30
屋面	250 mm 挤塑聚苯板	0.13	0.10~0.20
地面	150 mm 挤塑聚苯板	0.13	0.15~0.25
外窗（91 系列断桥铝窗，三玻两腔）	太阳得热系数综合值(SHGC)	冬季：≥0.45 夏季：≤0.30	
	传热系数	≤1.0	
	气密性	8 级	
	水密性	6 级	

外墙皮齐平[17],窗框四周使用30 mm节能附框(高强度石墨聚苯板节能附框,导热系数≤0.040 W/(m·K),外保温压覆窗框20 mm。门/窗框四周内侧粘贴防水隔汽膜,外侧粘贴防水透汽膜,窗上口采用成品滴水线条,窗下口采用成品窗台板保温以防止渗水[18]。冷水(热泵)机组制冷性能系数比GB 50189—2015《公共建筑节能设计标准》提高10%以上。空气热回收装置的全热回收效率不低于70%[19]。东、西、南向外窗采用电动外遮阳,遮阳盒生根位置采用30 mm厚聚氨酯隔热垫块[20]。

本项目采用了高性能玄武岩纤维复合材料围护结构等技术措施后,建筑本体节能率(一次能源)实现了超过60%的设计目标,达到国家和北京市公共建筑的超低能耗技术标准,用能性能相比常规建筑有了大幅度提升,有利于长期运营的节能减排。

4　结　论

1)本项目属于北京市试点推行的高标准建设项目,以高装配率(76%及以上)标准、绿色三星建筑标准、健康建筑标准、超低能耗标准、BIM技术应用、绿色建材等为基础,在高性能建筑方面进行了有益尝试。

2)采用装配式钢框架结构体系,应用高性能混凝土楼承板产品,有效提升了主体结构的安全、耐久性能。运用主动控制的消能部件优化设计方法,双主轴方向的刚度和附加阻尼基本一致,地震输入能量主要由消能部件消耗,主体结构承载力、变形及构件损伤程度达到“中震不坏”“大震可修”的性能目标。

3)实施超低能耗技术时,围护系统是重要组成部分。常规围护墙板的变形能力与高性能抗震结构的大变形水平不匹配,在设防地震工况下,对正常使用的性能目标有较大影响。采用轻质高强的玄武岩纤维复合材料装配式外墙板及配套的连接工艺,有效适应主体结构大变形的特点,保障“中震正常使用”“大震可修”的总体目标。该产品同时有效提升抗风、隔声和环保性能,适用于幼儿园建筑。

4)本项目探索了以抗震性能为主导因素、舒适性能相匹配的双目标综合设计方法,实现了抗震与节能性能综合提升的协调与适配,为多目标跨专业建筑设计的提升方向提供了有益参考。

参　考　文　献

[1] 中华人民共和国国务院. 建设工程抗震管理条例:2021第744号[EB/OL]. (2021-07-19)[2025-08-19]. https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5631815.htm.

[2] 赵楠,周同,王元丰. 基于可持续发展理念的北京市高标准住宅设计实践[J]. 工程建设与设计, 2021,453(4):3-7.

[3] 江亿. 我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J]. 暖通空调, 2005(5): 30-40.

[4] ISO. Thermal bridges in building construction-heat flows and surface temperatures-detailed calculations: ISO 10211: 2017[S]. France: European Standards Institute, 2017.

[5] 杨佳鑫,高彩凤,彭莉,等. 超低能耗公共建筑自适应照明与活动外遮阳综合影响研究:以北京某幼儿园为例[J]. 建筑科学,2023,39(12): 128-135.

[6] 赵楠. 中国科学技术馆新馆结构抗震性能设计[J]. 建筑结构,2024,40(2): 204-212.

[7] 高璐. 北方寒冷地区超低能耗办公建筑能耗指标研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2020.

[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式钢结构建筑技术标准: GB/T 51232—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[9] 梁兴文,王莹,于婧,等. 预制UHPC模板及采用预制模板的RC板受力性能及承载力分析[J]. 工程力学,2019,36(7): 146-155.

[10] 马凯,赵楠. 隔震支座布置方式对结构减震性能的影响分析[J]. 建筑结构,2013,43(8):28-31.

[11] 李婷,赵楠. 新中国科学技术馆复杂体型钢-混凝土混合结构的非线性动力弹塑性分析[J]. 建筑结构, 2009,39(12):121-123.

[12] RAJA B, MIRAMINI S, DUFFIELD C, et al. The influence of ambientenvironmental conditions in detecting bridge concrete deckdelamination using infrared thermography (IRT)[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020, 27(3), e2506.

[13] 杨润芳,彭梦月. 装配式超低能耗学校建筑项目探索:北京市昌平区未来科学城第二小学建设工程简介[J]. 建设科技,2021,20(19):57-60.

[14] 刘衍,崔临风,杨丽平,等. 墙体平均传热系数简化算法的辨析研究[J]. 建筑科学,2012,42(7):41-44.

[15] WESTOBY M J, BRASINGTON J, GLASSER N F, et al. Structure-from-Motion ' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications[J]. Geomorphology, 2012, 179: 300-314.

[16] ISO. Thermal bridges in building construction-calculation of heat flows and surface temperatures-part 2: linear thermal bridges: ISO 10211-2: 2001[S]. France: European Standards Institute, 2001.

[17] 冯国会,徐小龙,王悦,等. 以能耗为导向的近零能耗建筑围护结构设计参数敏感性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(6): 1069-1077.

[18] 陈强,王崇杰,李杰,等. 寒冷地区被动式超低能耗建筑关键技术研究[J]. 山东建筑大学学报,2016,31(1): 19-26.

[19] 康智强,王彤,王云毅,等. 严寒地区超低能耗教学建筑新风系统适用性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(2):345-351.

[20] 韩武松,宋占寿,赵刚. 北京市某被动式超低能耗幼儿园暖通空调系统设计[J]. 暖通空调,2021,51(7):72-77.