

引入楔形块调节误差的钢结构模块建筑连接节点设计研究^{*}

王霄翔^{1,2,4} 张明亮^{1,2} 陈浩¹ 王其良^{1,4} 胡昱昆³

(1. 湖南建设投资集团有限责任公司, 长沙 410004; 2. 湖南建工集团有限公司, 长沙 410008; 3. 中湘智能建造有限公司, 长沙 410114; 4. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075)

摘要: 钢结构模块建筑是一种新型的装配式建筑结构体系, 具有现场快速拼装且可循环利用的优点, 已成为建筑工业化的发展重点, 在我国已逐渐得到重视和广泛应用。其连接节点对结构体系性能有重要影响, 可以兼顾施工便捷和安全传力双重需求的连接节点是钢模块结构推广中的关键技术难点之一。重点针对钢结构模块建筑的单元间连接节点, 考虑现场存在施工误差的实际情况, 进行可调节施工误差的钢结构模块新型连接节点设计与研究。通过在节点中引入楔形块, 实现节点在施工过程中可以适度调节, 保障施工便捷性, 同时兼顾节点抗拉、抗压、抗剪等各方面力学性能; 系统阐述了该新型节点引入楔形块实现调节施工误差的基本原理、节点的详细设计、计算方法和施工安装方法, 并分析了该新型节点的优缺点; 同时也给出了新型节点的其他构造形式。该新型节点构造简单、传力明确、安装方便、能调节一定的施工误差, 且能满足节点力学性能要求, 可在钢结构模块建筑中广泛使用。

关键词: 钢结构模块建筑; 节点设计; 可调节; 施工误差; 楔形块; 施工方法

0 引言

在我国大力推广发展装配式建筑的背景下, 钢结构模块建筑得到了广泛的应用。模块建筑的结构体系异于传统的结构形式, 其将建筑整体模块化, 由结构稳定的模块单元通过单元间节点拼装成整体, 具有高工业化程度、高装配率的突出特点。钢结构模块建筑是模块建筑的典型代表, 其装配化程度更高、主要建筑材料可回收利用, 绿色低碳性能更加突出, 是我国建筑领域新结构体系方面的重点发展方向之一。

由于模块单元在工厂提前完成预制, 模块建筑现场施工时, 单元间连接节点对施工效率起着关键作用。连接节点既要满足受力的需求, 又要保障现场可快速施工装配。目前钢结构模块建筑主要采用梁间连接和角柱间连接两种形式, 且以角柱间连接形式居多。Chen等^[1]提出了一种箱式模块间的梁-梁连接节点, 丁阳等^[2]提出一种对穿螺栓-角件连接节点, Annan等^[3]提出了端板焊接节点, 邓恩峰等^[4]提出了一种采用十字形节点板螺栓连接的节

点, 王小盾^[5]等对角件旋转式模块单元连接节点进行了节点构造和力学性能的系统研究。Yu等^[6]、Liew等^[7]、Sanches等^[8]提出预应力式单元间连接节点, 在钢柱的4个角部分别配置预应力钢绞线, 并在钢管壁每侧布置插筋, 保障模块单元的可靠连接。王其良等^[9]提出了承插式连接节点, 采用上柱插头与下柱承接口承插连接, 有效连接上下两层箱体。在实际工程应用中发现, 由于施工现场存在一定的施工误差^[10], 节点普遍存在上下柱对中和装配困难的问题。因此本文重点针对钢结构模块建筑的单元间连接节点, 考虑现场存在施工误差的实际情况, 进行可调节施工误差的钢结构模块建筑新型连接节点设计研究。

^{*} 中国博士后科学基金项目(2023M731066); 湖南省科技创新计划项目(2022RC1185); 湖南省自然科学基金项目(2023JJ40270); 湖南省企业科技创新创业团队支持计划。

第一作者: 王霄翔, 博士后, 一级建造师, 主要从事钢结构、装配式建筑、智能建造等研究。

Email: 13920279887@126.com

收稿日期: 2023-08-09

1 引入楔形块调节误差的连接节点基本原理

在钢结构模块建筑中,上下模块之间多通过模块的4个角柱进行连接,在理想情况下上下模块柱可以准确对中,从而实现螺栓连接、承插连接等形式的节点连接设计。但实际施工中,由于构件加工尺寸偏差、现场施工误差累积等原因,普遍存在上下模块柱无法准确对中的情况,由此引发了对可调节施工误差的新型连接节点的思考和研究。

考虑到模块单元制作中的质量标准和实际施工过程中的质量控制,现场施工时上下模块柱连接时的施工误差一般不会过大;另外考虑到误差过大时,即使节点可进行一定的调节,也会导致节点传力出现问题,故节点可实现调节小幅误差即可。引入楔形块的调节原理,可高效解决以上问题,楔形块调节的基本原理如图1所示。

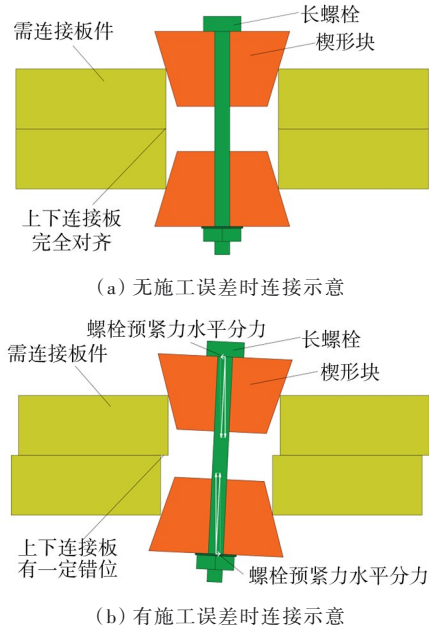


图1 楔形块调节施工误差原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of adjusting construction errors with wedge-shaped blocks

在无施工误差时,上下两个连接板完全对齐,上下楔形块也可以竖向完全对齐嵌入至连接板件中间的卡槽中,再通过长螺杆贯穿两个楔形块并拧紧,实现上下连接板的牢固连接,如图1(a)所示。在上下两个连接板存在施工误差时,上下两个连接板存在一定的错位,此时上下楔形块虽无法在竖向完全对齐且嵌入至连接板中间的卡槽中,但可以稍稍调整两个楔形块的角度,使楔形块的竖向中心线有微幅倾斜,此时再穿入长螺杆,并拧紧螺帽即可

实现上下连接板的牢固连接,同时在拧紧的过程中螺栓预紧力在水平方向的分量作用在连接板上,会对上下连接板的错位产生一定的促进复位作用,如图1(b)所示。

2 引入楔形块调节误差的连接节点设计

2.1 新型节点构造设计

在钢结构模块建筑连接节点中引入楔形块调节的基本原理,形成了可调节施工误差的新型钢结构模块连接节点,如图2~4所示。新型节点的核心部件包括连接板、上柱角件底板、下柱角件顶板、楔形块、长螺栓和螺母,在连接板的上下面均设有抗剪键,楔形块置于上柱角件底板和连接板上抗剪键之间以及下柱角件顶板和连接板下抗剪键之间;连接板上开有长圆孔,楔形块上开有竖向贯通圆孔,长螺栓穿过上下楔形块和中间连接板后通过螺母将上柱角件底板、连接板和下柱角件顶板进行连接,进而将上下柱角件连接成整体,同时连接板将各竖向角件在水平方向连接形成整体,实现节点整体连接。

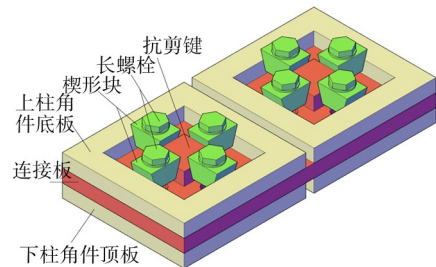


图2 新型节点三维结构示意

Fig. 2 3D diagram of the new type of joint

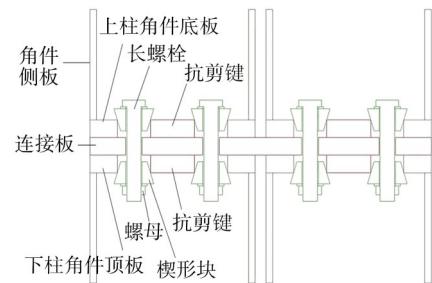


图3 新型节点剖面示意

Fig. 3 Sectional drawing of the new type of joint

节点中每套上下柱角件设置4组楔形块,其中2组楔形块水平横向设置,2组楔形块水平纵向设置,每组楔形块含上下两个,且通过长螺栓以及螺母连接。长圆孔同样有4个,分别位于抗剪键的四周,包

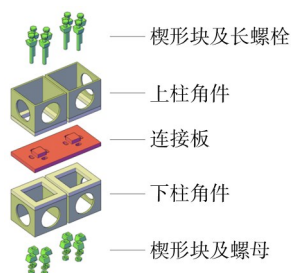


图4 新型节点整体爆炸图

Fig. 4 Exploded view of the new type of joint

括2个水平横向长圆孔和2个纵向长圆孔,如图5所示。另外,在长螺栓螺帽和楔形块之间以及螺母和楔形块之间均设置有垫片,防止螺栓工作过程中松动。对于应用在有反复振动、循环荷载等特殊情况下的节点,可采用防滑垫片、双螺母等措施予以加强,减少螺栓松动风险。

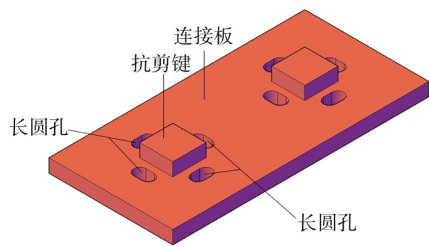


图5 新型节点连接板及抗剪键三维示意

Fig. 5 3D diagram of the connecting plate and shear connectors

该新型节点可适用于钢结构模块建筑的角柱节点、边柱节点和中柱节点,在应用于不同类型节点时,按连接板形状进行相应的调整即可。

2.2 新型节点特点分析

在新型连接节点中,采用了楔形块、连接板、长螺栓的组合,实现上下模块单元之间的竖向连接和水平抗剪连接,同时通过连接板实现不同模块单元之间的水平连接,提高节点连接的整体性。楔形块可以在上下模块安装存在施工误差的情况下实现一定的调整功能,保障上下模块通过长螺栓实现快速装配连接。在螺栓拧紧后,通过楔形块、抗剪键和角件顶底板的相互作用,可以使节点抵抗水平方向的剪力。连接板上设置的纵向长圆孔和横向长圆孔可再次调节水平纵向和水平横向的施工误差,保障长螺栓安装的便利性,同时又可分别保障节点水平横向和水平纵向的抗剪性能。其优点包括:1)整体构造简单,各组成部分加工制作简单方便,从而经济性较好且安装快速方便,有助于降低碳排放;2)引入楔形块调节原理并在连接板上设置长圆

孔,一定程度实现了对施工误差的调节,提高现场装配施工效率;3)节点中采用了整体连接板,可以在水平方向将各竖向角件连接形成整体,提高节点连接的整体性,增强模块节点域刚度;4)节点传力明确,长螺栓提供节点竖向抗拉承载力,楔形块、抗剪键和角件顶底板整体相互作用提供节点水平抗剪力,角件顶底板与连接板相互作用提供节点的竖向抗压承载力;5)采用螺栓实现节点的连接,避免了现场湿作业,实现现场装配施工,同时节点方便拆卸,便于模块单元重复利用,绿色环保;6)上下模块角件中间设置了连接板,使得上下层模块单元的梁及楼板之间均有一定的空隙,起到了一定的减振隔振作用,降低了上层单元模块楼板振动对下层单元模块的影响。

由于上下模块角件中间设置了连接板,因连接板有一定的厚度,会造成建筑层高的损失,同时也增加了模块单元拼缝处理的难度和工作量,因此在保证受力的前提下连接板的厚度宜越小越好。另外,由于楔形块和角件顶底板及抗剪键的接触为线面接触,会有一定的应力集中现象,在节点受拉、受剪等情况下较为严重,在节点实际应用时可通过在楔形块与顶底板和抗剪键接触位置处设置倒角或改为喇叭口的方式进行缓解处理。

2.3 新型节点强度设计

节点的强度设计计算及参数取值可参考GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[11]。该新型节点材料可选用常用的Q235、Q355、Q390等钢材,节点中的螺栓采用8.8级或10.9级高强螺栓,按照承压型连接进行设计计算,节点材料的强度应不低于模块柱材料的强度。自重和上部荷载压力作用通过上模块柱角件底板传递至连接板,再由连接板传递给下模块柱角件顶板,且正常情况下角件的壁厚一般不低于模块柱壁厚,故节点的抗压承载力大于模块柱的轴压承载能力。

2.2节中已指出,节点在实际应用时通过在楔形块与顶底板和抗剪键接触位置处设置倒角或改为喇叭口的构造方式来缓解应力集中。在此基础上,节点的抗拉和抗剪承载力设计计算方法如下:

1)节点抗拉承载力计算。上下模块柱通过楔形块和螺栓紧固连接,因此在竖向拉力作用下会产生张开分离趋势。考虑上下模块柱角件端部采用厚底板以提供较强的面外抗弯性能,因此该节点竖向抗拉承载力主要由长螺杆的抗拉承载性能决定。当采用图2中的4个长螺杆构造时(仅考虑单根柱

节点,下同),该新型节点的设计抗拉承载力 F_t 为:

$$F_t = 4 \times \frac{\pi d_c^2}{4} f_t^b = \pi d_c^2 f_t^b \quad (1)$$

式中: f_t^b 为螺栓抗拉强度设计值; d_c 为螺栓在螺纹处的有效直径。

2)节点抗剪承载力计算。由图3可见,该节点通过楔形块压紧卡固方式协调上下模块柱的施工偏差并填充底板开孔与抗剪键之间的间隙,使得上下模块柱可紧密装配。上下角件间传递水平剪力时可能产生水平方向的错动,该变形趋势首先要克服角件顶底板和连接板之间的摩擦力,之后水平板件之间的错动趋势将使得长螺杆产生弯剪变形,最终通过抗剪键提供水平抗剪承载能力。

第一阶段,底板和连接板之间未产生相对位移,该阶段的极限抗剪承载力 F_{v0} 为:

$$F_{v0} = 4\mu P + \mu G \quad (2)$$

式中: μ 为上下角件顶底板与连接板之间的摩擦系数; P 为施加在单个高强螺栓上的预紧力; G 为模块角柱传递到上角件的上部结构竖向作用力。

第二阶段,当摩擦力被克服时,角件顶底板和连接板之间将产生摩擦滑移,通过楔形块、抗剪键和角件顶底板之间的相互作用来抵抗水平剪力,该阶段可能产生螺栓杆剪断、孔壁承压破坏和抗剪键水平剪切破坏的破坏模式。该阶段的极限抗剪承载力 F_{v1} 为:

$$F_{v1} = \min(\pi d^2 f_v^b, 4dt f_c^b, f_v b_s^2) \quad (3)$$

式中: d 为螺杆直径; f_v^b 为螺栓抗剪强度设计值; t 为连接板厚度; f_c^b 为螺栓承压强度设计值; f_v 为抗剪键钢材的抗剪强度设计值; b_s 为正方形抗剪键的边长。

在节点设计时,为保障节点安全性能及正常使用功能,且考虑到“强节点、弱构件”的抗震设计要求,可偏安全地取 F_{v0} 作为节点的设计抗剪承载力 F_v ,即:

$$F_v = F_{v0} = 4\mu P + \mu G \quad (4)$$

2.4 新型节点表面处理

由于新型节点中楔形块对节点的调节功能起至关重要的作用,考虑到楔形块和连接板及角件顶底板之间的接触易产生应力集中现象,故对楔形块宜进行表面硬化处理,可采用渗碳淬火、氮化、表面淬火等方法进行处理。在节点连接完成后,为提高节点的耐久性,需通过角件施工孔对节点内部进行防腐处理,可采用喷涂防腐涂料等处理方式,同时在施工完成后对施工孔进行封堵。

3 引入楔形块调节误差的连接节点施工安装方法

该新型节点中,带有长圆孔和抗剪键的连接板可以在工厂一体化预制生产,楔形块通过简单的机加工即可实现批量化生产。现场施工时,在下层模块单元吊装安装完成后,将带有长圆孔和抗剪键的连接板放置在下柱角件顶板上,并与相应的轴线对齐,然后吊装上层模块单元,同样使上柱角件底板与连接板相应轴线对齐;在角件上设置有角件施工孔,将一套楔形块、垫片穿入长螺栓后,从上柱角件施工孔中放入节点内并使长螺栓穿过连接板上的长圆孔,且楔形块位于抗剪键和上柱角件底板之间,然后从下柱角件施工孔中再将一套楔形块、垫片穿入长螺栓,且楔形块位于抗剪键和下柱角件顶板之间,同时安装螺母,最后用专用扳手拧紧;一组施工完成后再施工下一组,施工顺序应由内到外,避免施工时相互干扰,完成全部4组楔形块和长螺栓的安装后,节点连接施工完成。整个施工安装过程如图6所示。

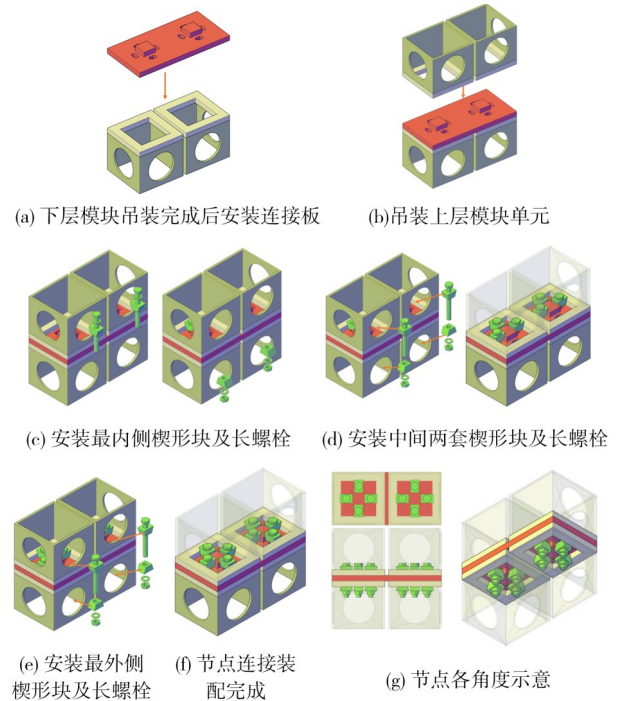


图6 新型节点施工安装过程示意

Fig. 6 Schematic diagram of on-site installation process of the new type of joint

4 引入楔形块调节误差的连接节点的其他构造形式

基于楔形块的调节原理,研究设计了新型连接节点的其他构造形式。根据其构造特点命名为楔

形块分离式夹板连接节点,如图7~9所示。

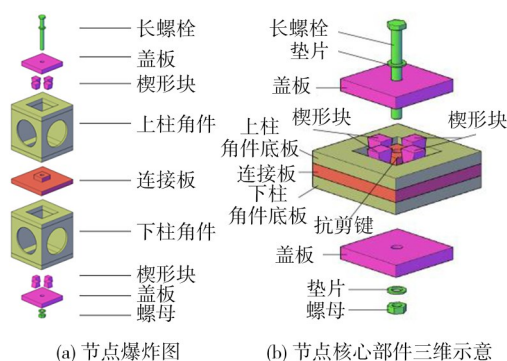


图7 楔形块分离式夹板连接节点爆炸图及核心部件三维示意

Fig. 7 Exploded view of separated plywood connections with wedge-shaped blocks and 3D diagram of core components of the joint

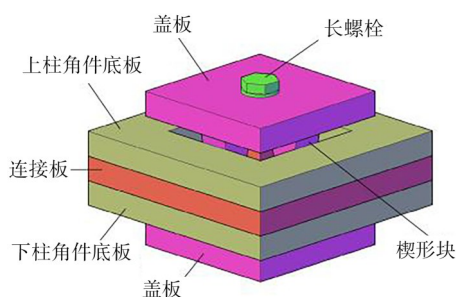


图8 楔形块分离式夹板连接节点核心部件装配完成后的三维示意

Fig. 8 3D diagram of core components of separated plywood connections with wedge-shaped blocks after assembly

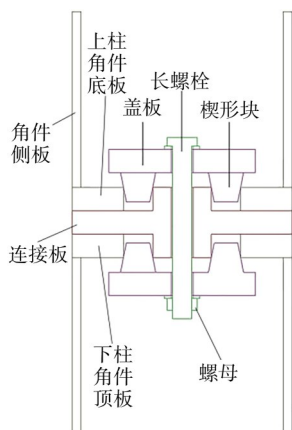


图9 楔形块分离式夹板连接节点核心部件装配完成后的剖面

Fig. 9 Sectional drawing of core components of separated plywood connections with wedge-shaped blocks after assembly

楔形块分离式夹板节点包括连接板、楔形块、盖板、上柱角件底板、下柱角件顶板、长螺栓和螺母等,连接板上下两面同样分别设置抗剪键,在抗剪键上开设竖向贯通孔,将楔形块置于上柱角件底板

与连接板上面的抗剪键之间以及下柱角件顶板与连接板下面的抗剪键之间,在盖板上设有竖向贯通孔,将长螺栓穿过上下两个盖板和中间的连接板后通过螺母将上下模块柱角件连接在一起。

该节点在装配施工时,安装楔形块之前的步骤与前述新型节点相同;在上层模块单元吊装完成后,将一套4个楔形块分别从上柱角件的施工孔放入节点内,并使楔形块卡在抗剪键与上柱角件底板所形成的沟槽中,然后将一个盖板放置在由4个楔形块底面形成的平面上;接着将一套4个楔形块按照定位位置采用少许结构胶点粘在另一盖板上,通过下柱角件的施工孔放入节点内,并使楔形块卡在抗剪键与下柱角件顶板所形成的沟槽中,下柱角件中的楔形块安装时采用结构胶点粘在盖板上的目的是便于施工,避免楔形块掉落;紧接着将长螺栓从上柱角件的施工孔放入节点内,使长螺栓从上往下依次穿过上柱角件内的盖板、连接板和下柱角件内的盖板,最后安装螺母并拧紧。

与前述新型节点相比,此种构造形式的节点现场装配更加快捷(现场仅需拧紧一套螺栓),但由于其盖板为一整体板,楔形块调节施工误差的能力有一定降低,且节点抗拉承载力仅由一个长螺栓提供,其抗拉承载力和节点整体刚度稍弱。

5 结论

1)引入楔形块调节原理的新型钢结构模块连接节点可以在一定程度上调节施工误差,其原理清晰,能够保障节点的抗压、抗拉和水平抗剪等力学性能且设计计算方法简单。

2)该新型连接节点可调节施工误差,加工制作方便,施工安装易于操作,同时构造简单、绿色低碳、整体性好、传力明确、安装便捷高效,满足装配式施工要求。

3)基于楔形块的调节原理还可以设计多种其他构造形式,可以满足调节施工误差的要求,符合装配式施工条件;但由于构造不同,其力学性能也有一定的差异。

参考文献

- [1] Chen Z H, Liu J D, Yu Y J. Experimental study on interior connections in modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2017, 147:625-638.
- [2] 丁阳,邓恩峰,宗亮,等. 一种模块化集装箱建筑连接节点: CN106988433A[P]. 2017-07-28.
- [3] Annan C D, Youssef M A, Naggar M H E. Experimental evalua-

- tion of the seismic performance of modular steel-braced frames [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31 (7): 1435-1446.
- [4] 邓恩峰,宗亮,丁阳. 集成模块钢结构螺栓-封板节点有限元分析[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第16届(ISSF-2018)学术交流会暨教学研讨会论文集. 青岛:2018.
- [5] 王小盾,丛子怡,刘佳迪. 角件旋转式模块单元连接节点抗拉性能研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(13): 93-101.
- [6] Yu Y J, Chen Z H, Chen A Y. Experimental study of a pre-tensioned connection for modular buildings[J]. *Steel and Composite Structures*, 2019, 31 (3): 217-232.
- [7] Liew J Y R, Chua Y S, Dai Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings [J]. *Structure*, 2019, 21: 135-149.
- [8] Sanches R, Mercan O, Roberts B. Experimental investigations of vertical posttensioned connection for modular steel structures[J]. *Engineering Structures*, 2018, 175: 776-789.
- [9] 王其良,唐明雄,陈浩,等. 一种钢结构单元房叠箱体系承插连接节点: CN215290662U[P]. 2021-12-24.
- [10] 方兴杰,危鼎,李昞清,等. 上海世茂深坑酒店双曲线异形钢结构施工过程误差控制[J]. *施工技术*, 2016, 45(23): 80-82, 88.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

Design and Research of Adjustable Joints Using Wedge-Shaped Blocks in Modular Steel Buildings

Xiaoxiang Wang^{1,2,4} Mingliang Zhang^{1,2} Hao Chen¹ Qiliang Wang^{1,4} Yukun Hu³

(1. Hunan Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha 410004, China; 2. Hunan Construction Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410008, China; 3. China-Hunan Intelligent Construction Co., Ltd., Changsha 410114, China; 4. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract:

Modular steel building is a new type of prefabricated building structure system. It has become the development trend of building industrialization and has been gradually valued and widely applied in China, because of its advantages of rapid assembly on site and recyclable materials. The inter-module joint has a significant impact on structure performance, and therefore the joint which can take both convenient construction and reliable force transmission into account is one of the key technical difficulties in the widespread application of modular steel buildings. In this study, the research focused on the connection joint between module units of modular steel buildings and especially conducted an in-depth research on the design and analysis of a new type of joint which is adaptable to construction errors, considering the actual situation of construction errors during site construction. By using wedge-shaped blocks in the joint, the new joint can be moderately adjusted in the construction process to ensure the construction convenience and efficiency, while taking into account the mechanical properties of the joint such as tensile properties, compressive bearing capacity and shear resistance. The basic mechanical principles of introducing wedge-shaped blocks to adjust construction errors, the detailed design scheme, calculation method and on-site installation process of the new type of joint were expounded. The advantages and disadvantages of the joint were also analyzed, and another structural form of the joint was given. The new type of joint has the advantages of simple structure, clear force transmission, convenient on-site installation, adaptable to certain construction errors, and can meet the requirements of mechanical bearing capacity, which can be widely used in modular steel buildings.

Keywords: modular steel building; joint design; adjustable; construction error; wedge-shaped blocks; construction method