

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.04.020

模块化变电站辅助用房钢框架结构侧向静力性能研究

郑跃¹, 曾志豪², 冯玉龙²

(1. 中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章针对某变电站工程中单层模块化变电站辅助用房钢框架结构的侧向静力性能进行研究,该辅助用房模块单元与基础之间采用地脚螺栓底板连接,模块单元之间采用翼缘高强螺栓和腹板对穿螺栓进行连接,施工简便且具有很好的施工空间;通过 ABAQUS 软件对模块化变电站辅助用房钢框架结构进行非线性推覆分析,考察结构及其节点的静力性能,给出一些连接构造的性能提升措施,可为类似工程提供参考。

关键词:变电站;模块化辅助用房;连接节点;有限元模拟;静力性能;连接构造优化

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)04-0562-08

Study on lateral static behavior of steel frame structures for modular substation auxiliary buildings

ZHENG Yue¹, ZENG Zhihao², FENG Yulong²

(1. China Energy Engineering Group Anhui Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper studies the lateral static behavior of the steel frame structure of the single-storey modular substation auxiliary building in a substation project. The module units of the auxiliary building are connected with the foundation by the base plate and anchor bolts. High strength bolts and split bolts are used to connect the flanges and webs of columns respectively between module units. The construction is simple and the construction space is good. In this paper, ABAQUS software is used to conduct a nonlinear pushover analysis of the steel frame structure of the modular substation auxiliary building. The static performance of the structure and its joints is investigated, and some measures to improve the performance of the connection joints are given, which can provide reference for similar projects.

Key words: substation; modular auxiliary building; connections; finite element simulation; static performance; connection structure optimization

变电站工程中,辅助用房是一类用于满足变电站值班及供电等生活和生产需求的建筑,也经常用于储存一些消防器具和电力生产、运维、检修工具。传统的辅助用房主要采用现场建造的方式,存在建设周期长、选址要求高、占地面积较大等问题^[1]。2013年以来,国内提出变电站标准化设计、工厂化加工、装配式建设的指导思想,开始逐步采用模块化变电站工程建设^[2-4]。模块化建筑是模块化变电站的载体,其是指在工厂制造装备齐全的三维预制模块,然后运输到施工现场并

组装成一个完整的建筑结构^[5-6],主要用于变电站辅助用房和设备用房。

连接节点是模块化建筑结构的研究重点。文献[7]提出一种模块化钢框架板式内套筒连接节点,利用内套筒采用焊接方式与下层模块柱连接;文献[8]提出一种角部连接件为十字形钢板加上、下2块盖板的节点,盖板外侧设置螺栓孔进行螺栓连接;文献[9]提出一种适用于成品盒式模块连接的十字形板-端板连接形式,进行轴压、轴拉和抗弯试验研究并得到该节点的承载力和破坏形

收稿日期:2022-10-19;修回日期:2023-01-17

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(2208085ME150);合肥工业大学产学研校企合作资助项目(W2021JSKF0656)

作者简介:郑跃(1986—),男,安徽宿州人,中国能源建设集团高级工程师;

冯玉龙(1990—),男,安徽滁州人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:feng_yulong@126.com.

式。以上连接主要针对用于办公或居住的多高层模块化建筑,变电站模块化建筑结构连接的研究相对较少;此外,目前一些模块间的连接节点施工并不简便,缺少施工空间^[10]。

变电站辅助用房常为单层或双层建筑,其层数较少,这为简化模块化连接节点和提高施工易操作性提供了条件。然而,对这些简单结构及其连接的受力性能研究并不多。需要注意的是,变电站辅助用房可以用于住人,也用于存放一些电力生产及其维修设备,忽略地震或者风荷载等水平作用下结构性能的研究,推广使用这种简单的结构和连接形式可能造成地震和风荷载下人员伤亡和经济损失,同时延缓灾害后变电站和社会城市功能的恢复时间。因此,有必要研究模块化变电站辅助用房钢框架结构的侧向静力性能。

本文主要通过 ABAQUS 软件对某模块化变电站辅助用房钢框架结构进行非线性推覆分析,考察结构及其节点的静力性能,并给出一些连接构造的性能提升措施。

1 模块化钢框架结构及其连接节点

1.1 模块化钢框架结构

某变电站工程生活办公辅助用房的结构布置如图 1 所示。

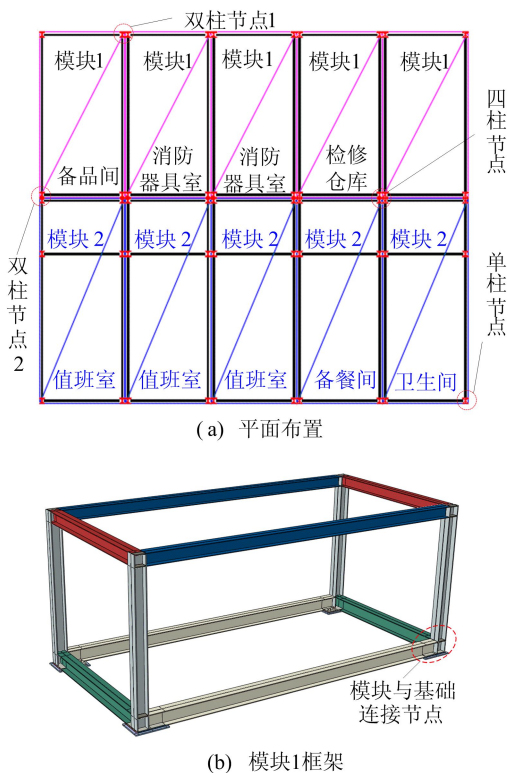


图 1 模块化变电站辅助用房结构布置及单个框架示意图

本文采用模块 1 及其不同组合形式的结构进行研究,模块化钢框架单元的梁柱均采用热轧普通 H 型钢,钢柱在与梁翼缘齐高处焊接有加劲肋。模块 1 框架整体尺寸为 6 200 mm×3 200 mm×2 800 mm(长×宽×高),柱、顶梁和底梁的截面分别为 HW200×200×9×15、HW200×200×8×10、HW250×200×8×12。

1.2 模块与基础连接节点

模块与基础节点如图 2 所示,单位为 mm。从图 2a 可以看出,模块与基础连接节点由钢梁、钢柱、柱脚底板、连接底板、悬臂梁段、地脚螺栓组成。在工厂中,在钢柱底部焊接柱脚底板,再将悬臂梁段与钢柱、柱脚底板及钢梁焊接形成柱脚节点。模块单元运输到施工场地后,与已经在现场固定好的连接底板通过地脚螺栓进行连接,并在连接底板上沿着钢梁与柱脚底板外围施加角焊缝。从图 2c~图 2e 可以看出,在双柱和四柱节点中,由于施工条件限制,不能在这些节点的柱脚底板四周都施加角焊缝。

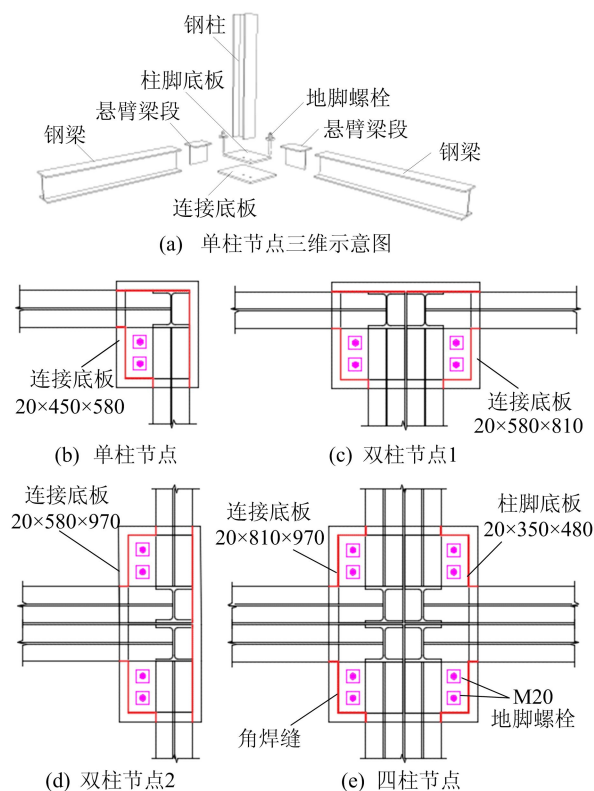


图 2 模块与基础连接节点示意图

1.3 模块间连接节点

模块间连接节点如图 3 所示,从图 3 可以看出,模块间连接节点通过高强螺栓与对穿螺栓实现模块柱与模块柱的连接,其中翼缘相对的钢柱

通过高强螺栓与垫板连接,腹板相对的钢柱通过对穿螺栓与套筒连接,翼缘高强螺栓和腹板对穿螺栓均设置在比顶梁下翼缘板低 50 mm 处。高强螺栓和垫板合称为翼缘连接组件,对穿螺栓和套筒合称为腹板连接组件。因为模块房间外侧会安装墙板,所以高强螺栓布置在房间内侧翼缘上。垫板的厚度即钢柱之间间隙为 10 mm,螺栓采用 10.9 级 M20 高强摩擦型螺栓,1 个螺栓的预紧力为 155 kN。套筒内径为 22 mm,外径为 44 mm。工程中在螺栓连接范围内,构件接触面采用喷砂处理,抗滑移系数设计值为 0.40。

上述 2 类节点主要采用螺栓连接,模块与基础连接和模块间连接位置分别在柱外侧和顶梁下侧,均远离节点区域,因此具有很好的施工空间,且安装简便。

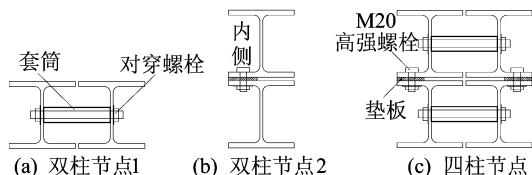


图 3 模块间连接节点示意图

2 数值模拟建模方法及其验证

2.1 建模方法

本文直接建立整体框架模型,既能分析 2 类节点变形、受力和损伤等局部反应,也能更好地研究整体结构的承载力和变形等性能。为了简化,模型中材料本构均选用双折线模型,螺栓和套筒、焊缝和其他部件的屈服强度分别设为 900、310、235 MPa,弹性模量为 210 GPa,泊松比取 0.3。所有单元均采用八节点线性六面体缩减单元 C3D8R,网格在底板、螺栓和焊缝关键部件处加密。梁和柱等框架的部件在模型中均使用“tie”进行绑定,形成 1 个框架整体。在连接组件与框架之间和连接底板、地脚螺栓与柱脚底板之间设置了接触模型,其切向行为采用库伦摩擦模型,螺栓附近接触面切向摩擦系数为 0.40,底板之间摩擦系数为 0.15,法向行为定义均为允许接触分离的“硬”接触。模型中边界条件设置为连接底板和地脚螺栓下底面固定约束。在 ABAQUS 分析步模块中打开几何非线性开关,用于体现结构几何非线性行为。模型建立参考点与柱顶耦合,在耦合点处施加位移荷载。为了真实模拟连接底板上的焊缝连接,建立等腰直角三角柱模拟角焊缝^[7],

未设置焊缝断裂模型。以单个框架为例,有限元模型如图 4 所示。

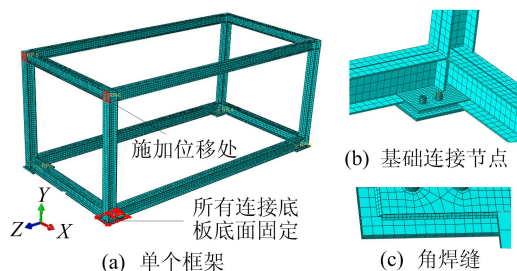


图 4 单框架有限元模型

2.2 模型验证

文献[9]对采用螺栓连接的模块间连接节点进行了静力加载试验。本文对该试验采用上述建模方式进行模拟,试验与模拟的结果对比如图 5 所示,从图 5 可以看出,屋面梁弯曲、楼面梁翼缘局部屈曲、梁之间错动、柱壁的应变线性发展等现象,与试验现象一致。试验与模拟的荷载-位移曲线如图 6 所示,从图 6 可以看出,模拟与试验的荷载-位移曲线吻合良好,这表明本文建模方式是可行的。

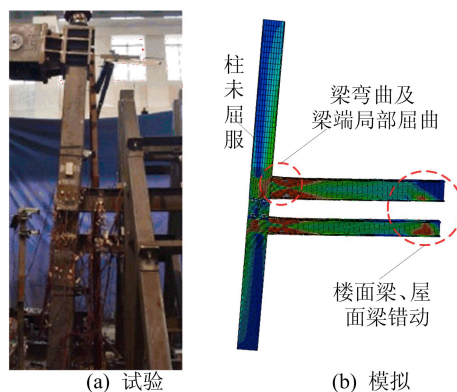


图 5 试验与模拟变形对比

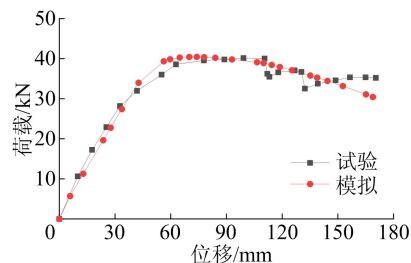


图 6 试验与模拟荷载-位移曲线的对比

3 模块化框架有限元模拟

3.1 模型及其加载方式

为研究模块与基础连接节点及单个框架的力学性能,建立 4 种单模块模型;为研究模块间连接

节点及整体结构的力学性能,建立不同模型结构且不同加载方式的多模块模型。各模型如图7所示。图7中:M1、M2和M4分别代表单、双和四模块单元组成的结构;M1(1)结构的模块与基础连接节点不施加角焊缝,其余结构均施加角焊缝;M2(1)、M2(2)分别代表短边和长边拼接的双模块结构;X、Z为加载方向;双模块和四模块模型编号中加载方向后的(1)和(2)分别代表对称整体

推覆和非对称单侧模块推覆。所有模型均在柱顶施加位移荷载,最大加载位移均为84 mm(位移角为3%),下文结果未特意说明时即为加载至84 mm的结果。

为简便分析,后文荷载-位移曲线中荷载取的是单个加载耦合点的反力而不是加载力的总和,当角柱与中间柱反力不同时(非对称加载模型),取中间柱的反力。

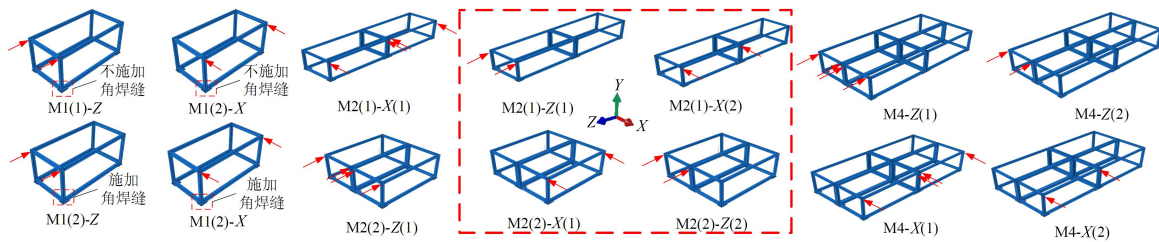


图7 各模型及其加载方式

需要说明的是,现场焊接与建筑工业化理念有一定的偏差,为了进一步简化现场施工,本文在单模块结构中对比研究柱脚有无焊缝对结构及其节点的静力性能的影响规律,为现场不施焊的类似工程应用提供理论参考。

在多模块模型结构中,M2(1)-X(1)、M2(2)-Z(1)均为对称加载,可分别通过与M1(2)-X、M1(2)-Z模型对比,用于研究双模块连接后受力与单模块单独受力性能的区别。M2(1)-Z(1)、M2(2)-X(1)均在平行模块拼接方向对称加载,加载方向平行高强螺栓或对穿螺栓的螺杆轴向,使一个框架去推动加载方向上的另一个框架;M2(1)-X(2)、M2(2)-Z(2)均为沿垂直模块拼接方向非对称加载,同时也是垂直螺杆轴向水平推覆单侧模块,使高强螺栓或对穿螺栓抗剪;以上2组对比模型(图7红色框内)用于研究不同工况下翼缘连接组件或腹板连接组件的力学性能以及结构的位移协调能力。对M4采用类似加载方式,可用于比较双柱节点和四柱节点中的高强螺栓或对穿螺栓的性能差别,以及比较M2和M4中双柱节点的性能差别。

3.2 单模块模型分析结果

3.2.1 单模块结构的荷载-位移曲线

单模块模型荷载-位移曲线如图8所示。从图8可以看出:在Z方向加载下,施加角焊缝模型M1(2)-Z的抗侧刚度和承载力明显大于未施加角焊缝模型M1(1)-Z;然而,在X方向加载下,施加角焊缝模型M1(2)-X的抗侧刚度和承载力

与未施加角焊缝模型M1(1)-X较为接近;Z方向、X方向加载下,施加角焊缝模型的初始抗侧刚度分别提升约66%、14%。这主要是因为Z方向加载时,Z方向抗侧框架的框架柱为强轴方向受力,且框架梁较长,这使得Z方向抗侧框架的梁柱线刚度比较小,底梁对框架柱底转动约束较弱,此时,将柱底约束从螺栓铰接改为焊缝刚接时,可显著改变柱底约束强弱,进而显著影响Z方向抗侧框架的刚度和承载力;与之相反,X方向抗侧框架的梁柱线刚度比较大,底梁对框架柱底转动约束较强,此时,柱底是否施加角焊缝对柱底约束强弱、框架抗侧刚度和承载力影响均较小。

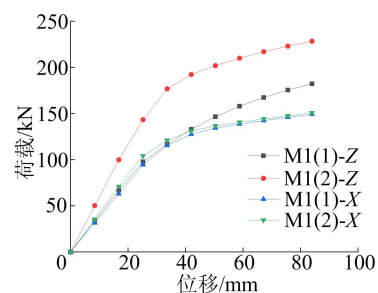


图8 单模块荷载-位移曲线

3.2.2 M1结构应力变形分析结果

M1(1)、M1(2)计算结果如图9所示。本文计算结果中,应力均为Mises应力,单位为MPa。从图9可以看出,与M1(1)-Z相比,M1(2)-Z的Z方向抗侧框架的底梁应力较小,但其柱底部区域应力较大。这是因为M1(1)-Z柱脚底板与基础没有焊接,框架与基础的连接接近铰接,柱底端

部弯矩可以基本传递至底梁梁端;而 M1(2)-Z 施加角焊缝,其框架与基础的连接接近刚接,弯矩传递到基础,底梁几乎不受力。从图 9 还可以看出,与 M1(1)-X 相比,M1(2)-X 的 X 方向抗侧框架的底梁应力也较小,其原因与 Z 方向受力类似。然而,M1(1)-X 与 M1(2)-X 柱底部区域应力较为接近,这主要是由于两者柱底约束强弱和抗侧刚度较为接近。

对比有无焊缝模型可知,M1(1)框架梁柱应力总体上小于 M1(2),由于 M1(1)柱底板抬升量较大,其柱脚底板应力和地脚螺栓应力比 M1(2)大。本文建议柱底与基础螺栓连接在满足框架刚度和承载力设计要求时,为了现场施工简便,可以采用此种连接。

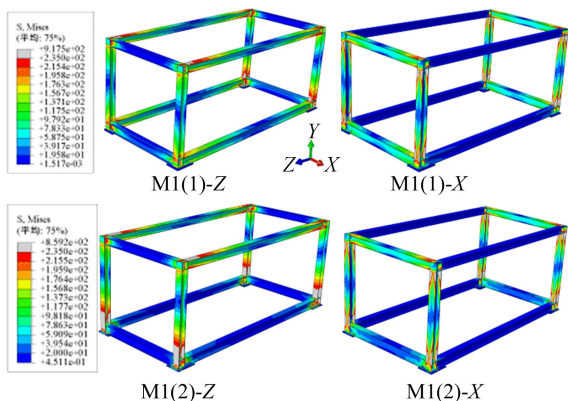


图 9 M1(1)、M1(2)计算结果

3.3 多模块模型分析结果

3.3.1 多模块结构的荷载-位移曲线

多模块模型及 M1(2)模型的荷载-位移曲线如图 10 所示。

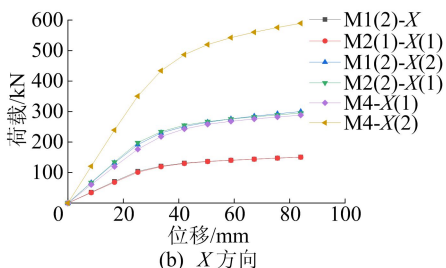
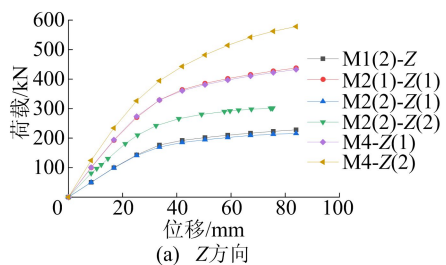


图 10 Z 方向、X 方向荷载-位移曲线

与单模块结构相比,双模块结构因施工空间问题,模块连接处会缺少部分角焊缝;同时,多模块模型中相邻模块柱脚底板连接在同一个连接底板上。由图 10 可知:M2(2)-Z(1)、M2(1)-X(1)分别与 M1(2)-Z、M1(2)-X 基本重合;M4-Z(1)、M4-X(1)分别与 M2(1)-Z(1)、M2(2)-X(1)基本重合,这表明缺少的部分角焊缝以及共用连接底板对结构的抗侧刚度影响较小。

相同加载位移下,M2(1)-Z(1)、M2(2)-X(1)的承载力分别约为 M1(2)-Z、M1(2)-X 的 2 倍,这表明加载方向与螺栓螺杆轴向相同时,翼缘和腹板连接组件都能有效传递荷载。需要注意的是,M2(1)-X(2)、M4-X(2)的承载力分别约为 M1(2)-X、M2(2)-X(1)的 2 倍;然而,M2(2)-Z(2)、M4-Z(2)的承载力分别约为 M1(2)-Z、M2(1)-Z(1)的 1.5 倍,小于 2 倍;这表明翼缘连接组件在其垂直螺杆方向传递荷载的能力较强,而腹板连接组件在其垂直螺杆方向传递荷载的能力较小。

3.3.2 M2(1)结构应力变形分析结果

M2(1)-Z(1)的计算结果如图 11 所示。

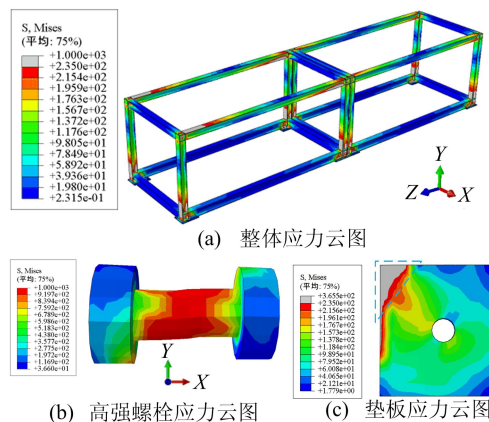


图 11 M2(1)-Z(1)计算结果

从图 11a 可以看出,加载侧与非加载侧框架的应力分布均与单模块 M1(2)相似。在加载过程中,由于加载力与垫板不在同一高度上,且螺栓杆与孔壁之间存在间隙,柱子在转动时,垫板与柱翼缘之间会发生微小滑移,螺栓受到严重的剪切作用。从图 11b 可以看出,加载到 84 mm 时能观察到螺栓发生较明显的剪切变形。该节点螺栓的最终破坏形式为剪切破坏。同样由于加载力与垫板不在同一高度上,且垫板位于框架内侧(图 3a),垫板受偏向压力作用,垫板平面内受力并不均匀,一角受两柱的挤压最为严重,因此加载时垫板一角最先屈服,但屈服面积较小。从图 11c 可以看

出,加载到 84 mm 时,屈服面积约为垫板的1/20,此时垫板仍能继续工作。

M2(1)-X(2)的计算结果如图 12 所示。本文计算结果中,位移单位均为 mm。从图 12a 可以看出,模块连接处,垫板连接的 2 根柱子位移基本相同,这表明翼缘连接组件具有较好的传递和协调位移能力,而最右侧的柱子位移较小,这主要是由于右侧模块顶梁发生弯曲变形。从图 12b、图 12c 可以看出,高强螺栓仍处于弹性状态,垫板基本处于弹性阶段,这表明该受力状态下螺栓能满足抗剪要求。

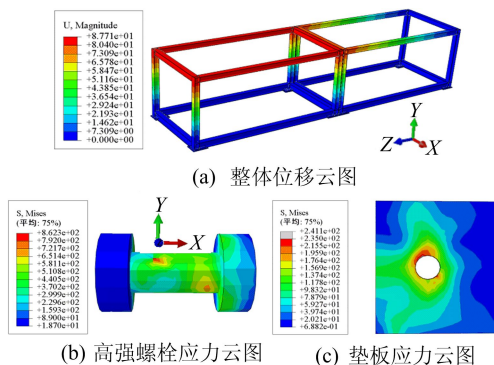


图 12 M2(1)-X(2)计算结果

3.3.3 M2(2)结构应力变形分析结果

M2(2)-X(1)的计算结果如图 13 所示。套筒能够承受来自两柱之间的挤压作用,对穿螺栓承受框架位移的影响较小。由于对穿螺栓长度较大,螺栓发生转动较小,相比在 M2(1)-Z(1)加载形式下的高强螺栓,并不会受到严重的剪切作用,对穿螺栓基本处于弹性状态。由于加载力与套筒不在同一高度上,套筒靠近加载侧的上部由于偏向受压导致该处受压最重,加载至 84 mm 时,套筒也只有该处应力较大。这表明对穿螺栓-套筒连接 H 型模块柱腹板的方式在该加载形式下安全可靠。

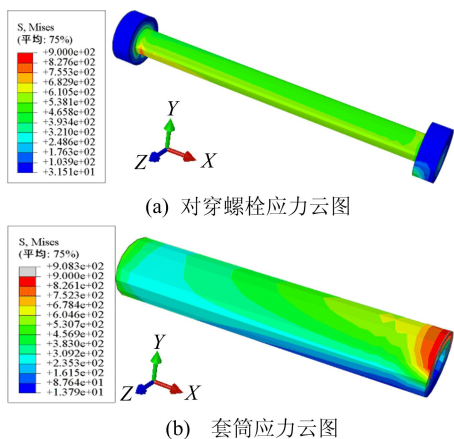


图 13 M2(2)-X(1)计算结果

M2(2)-Z(2)加载至 56 mm(2%层间位移角)时的计算结果如图 14 所示。因为对穿螺栓长度较大,所以左侧模块的位移难以带动右侧框架的位移,从图 14a 可以看出,左侧模块柱顶位移为 56 mm 时,右侧模块柱顶位移仅为 32 mm 左右。此外,从图 10 可以看出,M2(2)-Z(2)的承载力小于 M1(2)-Z 的 2 倍。这些结果表明,对穿螺栓连接在其垂直方向传递位移和荷载的能力均较低。模块连接处柱子发生偏转之后,对穿螺栓承受较大的剪力与弯矩,螺栓应力较大。加载至 12 mm 时,螺栓杆端屈服,随后屈服范围迅速扩大至杆中部,因此对穿螺栓在该受力状态下容易发生破坏。

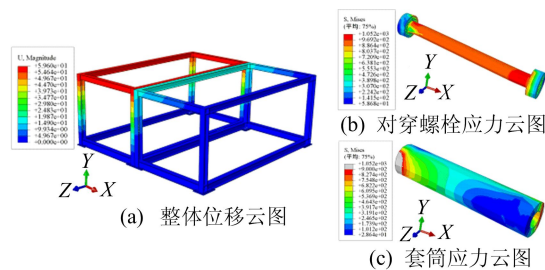


图 14 M2(2)-Z(2)计算结果

3.3.4 M4 结构应力变形分析结果

在 M4 的结果中观察到与 M2 结构相同的结果,考虑篇幅有限,这些结果未列出。因此在相似加载下,考察更多模块模型中螺栓性能参考上述双模块模型 M2(1)和 M2(2)即可。

值得注意的是,模型 M4-Z(2)的加载形式是最为不利的工况,该模型中加载侧框架的高强螺栓和所有对穿螺栓都有较大的剪切变形,螺栓区域基本屈服。

4 连接构造优化研究

上文已经研究基础连接节点的优化,即不设置焊缝对结构的影响。本节针对前文多模块研究中模块间连接节点容易出现的破坏形式提出构造的优化方法。

4.1 翼缘螺栓数量

由 3.3.2 节分析可知,高强螺栓在沿模块拼接方向整体推覆结构时,即在 M2(1)-Z(1)等模型中,存在抗剪能力不足的问题,因此选择增加螺栓数量解决此问题,以原螺栓为基准,在柱竖向高度上向下增加螺栓数量,螺栓间距为 100 mm,增加垫板长度使所有螺栓可以共用一块垫板。在 M2(1)-Z(1)模型的基础上分别建立 2、3、4 个螺栓的模型,各模

型荷载-位移曲线如图 15 所示。

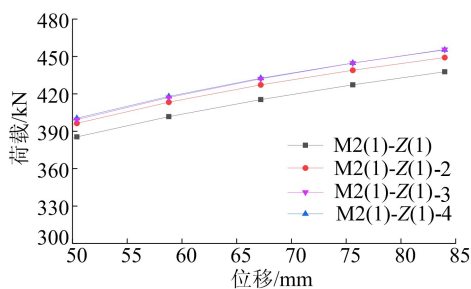


图 15 不同高强螺栓数量时结构荷载-位移曲线

从图 15 可以看出,螺栓数量增加到 2 个或 3 个时,承载力有较为明显的提升,增加到 4 个则基本没有影响。由螺栓的应力损伤发现:螺栓数量增加到 2 个时,最大等效塑性应变由 0.146 降到 0.089,减小了 39%;增加到 3 个螺栓时,最大等效塑性应变由 0.089 降到 0.029,降低了 67%;增加到 4 个螺栓时,最大等效塑性应变为 0.025,仅降低 14%。说明在 3 个螺栓以下时,增加螺栓数量能有效减小螺栓的损伤;增加到 3 个后,再增加螺栓数量影响不大。综上,翼缘连接组件建议采用的高强螺栓数量为 2~3 个。

4.2 拓宽式垫板

由 3.3.2 节分析可知,对穿螺栓在沿垂直模块拼接方向推覆单侧模块时,即在 M2(2)-Z(2) 等模型中,存在抗剪能力不足的问题。本文提出采用拓宽式垫板的方式改善上述问题,使拓宽式垫板与对穿螺栓共同抗剪,拓宽式垫板的布置如图 16 所示。

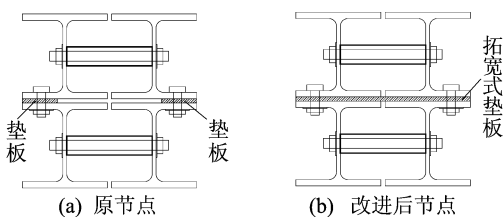


图 16 拓宽式垫板示意图

图 16 中,拓宽式垫板宽度为 410 mm。对于四模块结构,可将四柱节点处的 2 块垫板换成 1 块拓宽式垫板,双模块结构 M2(2)类似,可以在模块连接处、同样高度处,利用拓宽式垫板连接相邻模块柱的翼缘。

为研究该方式的可行性,以四模块结构为例,在 M4 结构的基础上采用上述方式建立结构 M4-T,其计算结果如图 17 所示。由图 17 可知,采用

拓宽式垫板后对穿螺栓的变形以及等效塑性应变有明显的减小,拓宽式垫板中部损害较为严重。同时未受加载的右侧模块柱位移相比原模型有较大提升,说明拓宽式垫板也可以增加对穿螺栓连接协调位移的能力。因此采用拓宽式垫板后,垫板能承受很大一部分剪切作用,能有效减小对穿螺栓的应力损伤,结构抗剪性能提升。对比图 17d 和图 11c 可知,采用拓宽式垫板还能解决原节点在沿高强螺栓轴向推覆时垫板一角屈服的问题。

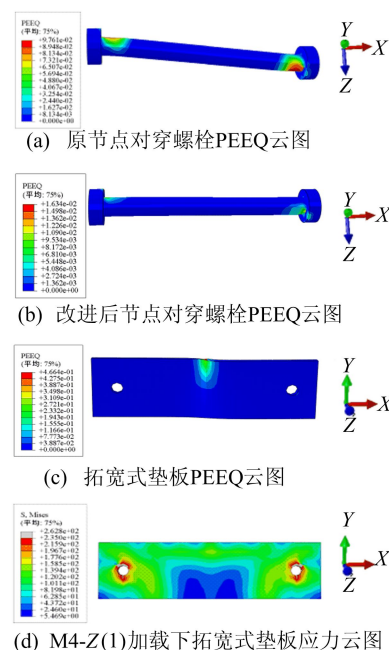


图 17 M4-T 模型计算结果

5 结 论

1) 单模块模型中,长梁方向(Z 方向)加载下,柱底与基础连接形式对框架抗侧刚度、承载力和应力分布影响较大,但短梁方向(X 方向)加载下影响较小,这主要是由于短梁方向抗侧框架的梁柱刚度比较大,底梁对柱底约束较大。

2) 单模块模型的应力分布结果表明柱底底板与基础螺栓连接可以近似为铰接,底板与基础施加角焊缝后连接可以近似为刚接;柱底底部不施加角焊缝时,柱脚底板有较大的抬升位移,其框架抗侧刚度、承载力和梁柱应力较小,柱脚底板与地脚螺栓应力较大。

3) 沿螺杆轴向推覆整体结构时,M2(1)模型中高强螺栓会受到剪切破坏,M2(2)模型中对穿螺栓及套筒性能良好,框架整体承载力均为单模

块 M1(2)的 2 倍,表明加载方向与翼缘高强螺栓和腹板对穿螺栓的螺杆轴向相同时,翼缘连接组件和腹板连接组件都能有效传递荷载。

4) 沿垂直螺杆轴向水平推覆单侧框架时, M2(1)模型高强螺栓性能良好,其整体承载力为单模块 M1(2)的 2 倍,在模块间连接处两侧框架柱的位移基本相同; M2(2)模型对穿螺栓会受到弯剪破坏,其整体承载力小于单模块 M1(2)的 2 倍,在模块间连接处两侧框架柱的位移相差较大,这表明翼缘连接组件在其垂直螺杆方向传递荷载和协调位移能力较强,而腹板连接组件在其垂直螺杆方向传递荷载和协调位移的能力较小。

5) 连接构造优化研究表明,增加 M2(1)-Z(1)模型中高强螺栓数量能有效减小螺栓的损伤和框架承载力,螺栓数量大于 3 时,螺栓数量对螺栓损伤和框架承载力的影响变得不明显;采用拓宽式垫板可以减小对穿螺栓的变形以及损伤,增加其在垂直螺杆方向传递荷载和协调位移能力,能有效提升 M4-Z(2)等模型的结构抗剪性能。

为提高变电站用地资源利用率,多层模块化钢框架结构在未来的变电站工程中可能会被推广应用,高效模块竖向连接的研发及其对整体结构性能的影响规律有待进一步研究。

参考文献

- [1] 邹平丽. 传统土建新能源变电站与模块化预制舱变电站对比分析[J]. 机电信息, 2020(15): 38-39.
- [2] 盛晓云. 标准配送式智能变电站建设实践[J]. 通讯世界, 2014(1): 104-106.
- [3] 狄谦, 谢晓磊, 康雪晶, 等. 预制舱式模块化变电站关键技术研究[J]. 电气应用, 2019, 38(12): 57-61.
- [4] 宋爽. 预装式变电站的发展现状和技术对比[J]. 新型工业化, 2020, 10(4): 17-22.
- [5] SENDANAYAKE S V, THAMBIRATNAM D P, PERERA N J, et al. Enhancing the lateral performance of modular buildings through innovative inter-modular connections [J]. Structures, 2021, 29: 167-184.
- [6] 曲可鑫. 钢结构模块化建筑结构体系研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [7] 刘明扬. 模块化钢框架新型连接节点及结构力学性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- [8] CHEN Z H, LIU J, YU Y. Experimental study on interior connections in modular steel buildings [J]. Engineering Structures, 2017, 147: 625-638.
- [9] 王清霖. 钢结构盒式模块间十字形板-端板连接节点静力性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [10] 叶景荣, 于宏. 钢结构模块建筑连接节点研究进展[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(3): 9-12, 36.
- [11] (责任编辑 张 娟)
- [12] CASTRO L, T ÓRTORA V, MANSILLA S, et al. Aconitases: non-redox iron-sulfur proteins sensitive to reactive species[J]. Accounts of Chemical Research, 2019, 52(9): 2609-2619.
- [13] POEWE W, SEPPI K, TANNER C M, et al. Parkinson disease [J]. Nature Reviews Disease Primers, 2017, 3(1): 17013.
- [14] DIXON SCOTT J, LEMBERG KATHRYN M, LAMPRECHT MICHAEL R, et al. Ferroptosis: an iron-dependent form of nonapoptotic cell death[J]. Cell, 2012, 149(5): 1060-1072.
- [15] URSINI F, MAIORINO M. Lipid peroxidation and ferroptosis: the role of GSH and GPx4[J]. Free Radical Biology & Medicine, 2020, 152: 175-185.
- [16] 陈理达. 阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征与肝损伤的相关性及机制研究[D]. 福州: 福建医科大学, 2021.
- [17] VALENTE E M, ABOU-SLEIMAN P M, CAPUTO V, et al. Hereditary early-onset Parkinson's disease caused by mutations in PINK1 [J]. Science, 2004, 304(5674): 1158-1160.
- [18] MILLS R D, SIM C H, MOK S S, et al. Biochemical aspects of the neuroprotective mechanism of PTEN-induced kinase-1 (PINK1) [J]. Journal of Neurochemistry, 2008, 105(1): 18-33.
- [19] CHEN B, WEN X, JIANG H, et al. Interactions between iron and α -synuclein pathology in Parkinson's disease[J]. Free Radical Biology & Medicine, 2019, 141: 253-260.
- [20] JIANG X, STOCKWELL B R, CONRAD M. Ferroptosis: mechanisms, biology and role in disease[J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2021, 22(4): 266-282.
- [21] ZUO Y, XIE J, LI X, et al. Ferritinophagy-mediated ferroptosis involved in paraquat-induced neurotoxicity of dopaminergic neurons: implication for Neurotoxicity in PD [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2021, 2021: 9961628.
- [22] WANG Y Q, CHANG S Y, WU Q, et al. The protective role of mitochondrial ferritin on erastin-induced ferroptosis [J]. Frontiers in Aging Neuroscience, 2016, 8: 308.
- [23] (责任编辑 闫杏丽)