

上海中心大厦巨型框架关键节点设计研究

丁洁民¹, 李久鹏², 何志军¹

(1. 同济大学建筑设计研究院, 上海 200092; 2. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092)

摘要:上海中心大厦主体结构采用巨型框架-伸臂-核心筒结构体系,节点设计是巨型框架设计中的关键环节。介绍了基于性能的节点设计原则,研究了伸臂桁架与巨型柱连接节点、环带桁架螺栓拼接节点两类典型节点。伸臂桁架与巨型柱连接节点,节点区受力复杂,同时承受较大的轴力与弯矩,运用有限元方法对该类节点简化设计公式的适用性进行了验证。研究表明:简化设计公式能够满足工程精度要求,可作为该类节点初步估算的验算公式;环带桁架螺栓节点具有螺栓拼接长度超长、螺栓数量多、构件截面大及拼接板材厚度大的特点,运用有限元方法研究了该类节点的传力机理,并对螺栓拼接节点的安全性进行了考察。研究表明:该类节点满足指定性能需求下的承载力设计要求,螺栓传力呈现两端大,中间小的受力性态,但随荷载的增加螺栓传力不均匀性呈降低趋势;同时研究还表明,螺栓拼接长度较长会改变构件的力学特性。

关键词:超高层混合结构;节点;基于性能设计;有限元分析;螺栓拼接

中图分类号:TU972.3 **文献标志码:**A

Research on key joints design of mega frame of the Shanghai Tower

DING Jiemin¹, LI Jiupeng², HE Zhijun¹

(1. Architectural Design & Research Institute of Tongji University (Group) Co., Ltd, Shanghai 200092, China;

2. Building Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The Shanghai Tower adopts the lateral resisting system of mega frame-core-outrigger structure. Joints design is the key phase during design procedure of the mega frame. Firstly, the principles of the performance-based design of joints were introduced briefly. Secondly, the design of two typical joint of the mega frame, the joint of outrigger to super-column and the long bolt joint of the belt truss, were checked. The joint of outrigger to super-column bears bending moment and axial force, the stress state of which was very complicated. The reasonableness of simplified formula was verified by using finite element analysis. The results show that the simplified formula meets the project requirements and can be accepted as a check formula in the preliminary design. The long bolt joint of the belt truss which has a super-long length includes a large quantity of bolts, thick splice plates and thick member sections. According to finite element analysis, the performance and mechanical behavior of the joint are revealed and its reliability is verified too. The results show that the bolt joint has enough capacity under specific performance requirements. Terminal bolts transfer more force and intermediate bolts transfer little. With the increasing of loads, the nonhomogeneity of transfer force of bolts reduces. The mechanical property of members will be changed as the bolt joint has large length.

Keywords: super high-rise mixed structure; joint; performance-based design; FEA; bolt joint

作者简介:丁洁民(1957—)男,江苏泰兴人,工学博士,教授。E-mail: djm@tjadri.com

通讯作者:李久鹏(1982—)男,河北沧州人,博士研究生。E-mail: lijip317@163.com

收稿日期:2011年5月

0 引言

上海中心大厦主体结构采用巨型框架-伸臂-核心筒结构体系,巨型框架结构由 8 根巨型柱、4 根角柱、8 道位于设备层两个楼层高的箱形空间环带桁架以及沿竖向布置的 6 道两个楼层高的伸臂桁架组成,伸臂桁架分别位于 2 区、4 区、5~8 区的加强层^[1]。结构剖面图及设备层结构体系布置如图 1 所示。巨型框架-伸臂系统作为上海中心大厦结构的重要组成部分,承担了结构约 50% 的基底剪力、重力荷载、以及 80% 的倾覆力矩。节点作为巨型框架设计中的关键环节,对于保证巨型框架结构体系的成立、

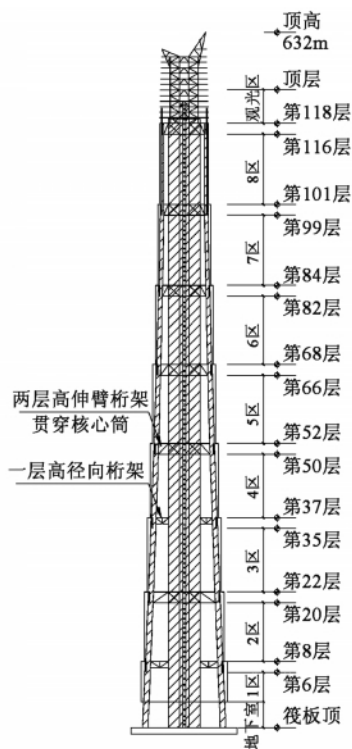
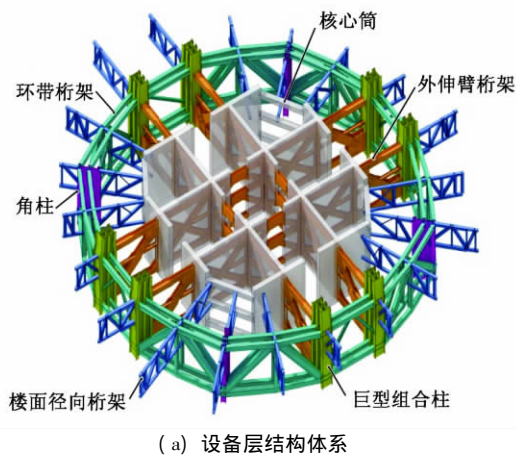


图 1 巨型框架结构布置

Fig. 1 Structural layout plan of mega frame

确保整体结构的安全,具有重要作用。

上海中心大厦节点设计难度主要体现在: ① 构件复合受力,节点区内力复杂。由于上海中心大厦巨型框架构件截面尺寸较大,通常杆件截面高度与其几何长度之比大于 1/15(1/10),众多桁架构件并非单纯承受轴力作用,而是弯矩与轴力复合受力,根据 GB 50017—2003《钢结构设计规范》^[2] 8.4.5 条规定,节点设计时应充分考虑次弯矩影响; ② 构件截面巨大,板件厚,螺栓拼接难度大。上海中心设计大厦结构中大量采用了 100mm 以上的超厚板,且很多重要构件在常规重力荷载及侧向荷载作用下均以受拉为主,为保证现场构件的拼接质量,大部分构件采用螺栓拼接。而构件内力较大,造成螺栓群拼接长度超长,部分螺栓拼接接头长度超过 4m,单个接头螺栓数量超过 600 颗。对于超长螺栓群的工作性能尚需研究。

上海中心大厦结构设计采用了基于性能的设计方法,根据不同部位结构构件在结构整体安全性中所起的作用,采取了不同的设计要求,对结构整体安全具有重要作用的结构构件,提高了设计要求。诸如,对于环带桁架按大震不屈服性能要求进行设计,对于伸臂桁架则按中震弹性的性能要求进行设计。

基于性能设计一般仅对结构体系及不同部位的结构构件加以区分,提出相对具体、明确的设计、验算要求。而对于节点则通常仅给出“节点破坏晚于构件”、“节点保持弹性”等要求,实际操作中因为节点所处部位及连接构件的性能要求不同,实现上述要求所采用的节点设计指标也应有所差异。如采用统一的设计方法则可能造成材料强度不能充分发挥、节点设计不安全等问题,也与基于性能的设计理念相悖。基于性能化的设计原则,上海中心大厦巨型框架节点设计时,针对不同性能水准的结构构件,其节点设计时采用了与构件相匹配的不同性能水准,针对不同的性能要求采取相应的设计验算指标,以确保整体结构体系性能要求的实现。

本文首先介绍了上海中心巨型框架关键节点的设计原则,并选取上海中心大厦结构设计中伸臂桁架与巨型柱连接节点及超长螺栓拼接节点两个典型关键节点进行了研究,运用数值分析验证了上海中心巨型框架节点设计的安全性及简化设计方法的可行性。

1 设计原则

根据 GB 50017—2003《钢结构设计规范》^[2] 以及 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[3],按照“强节点、弱构件”的设计目标,对节点区进行设计。节点设

计包括杆件自身拼接设计以及杆件汇交节点设计。

为体现性能化的设计方法,依照构件节点与构件性能相匹配的原则,对不同节点的设计要求进行了区分,节点设计采用与构件相匹配的性能水准,当节点连接的不同构件性能水准不同时,采用较高性能水准进行设计。上海中心大厦巨型框架性能目标要求如表 1 所示。

表 1 上海中心巨型框架构件的性能目标
Table 1 Performance goals of members of mega frame

构件	性能目标
巨柱	中震弹性
伸臂桁架	中震不屈服
环带桁架	中震弹性,大震不屈服

设计分为两个阶段:第一阶段为弹性设计,对于杆件拼接,采用截面承载力进行设计。对于节点板,采用最不利工况的内力组合进行设计;第二阶段为极限承载力验算,采用构件截面屈服(屈曲)承载力并考虑适当的超强系数进行设计,以确保连接和节点区破坏晚于构件。

1.1 杆件自身拼接设计

GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[3] 8.2.8 条规定钢结构杆件的拼接应按构件截面承载力进行弹性设计,并进行极限承载力验算。拼接设计按连接形式可分为焊接拼接及螺栓拼接。

(1) 焊缝拼接:对于全截面的一、二级全熔透焊缝,因为焊接要求焊材的熔敷金属强度要略高于母材强度,弹性设计计算和极限承载力的验算(第一阶段和第二阶段)均自动满足。

(2) 螺栓拼接:螺栓拼接应按照截面承载力设计值进行弹性阶段等强拼接设计,并应按照 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》^[3] 中 8.2.8 条有关公式进行极限承载力验算。

不同性能水平构件的拼接设计,拼接材料强度取值有所区别,对应于构件的设计荷载和屈服荷载,分别采用相应的代表值,反映节点的性能需求。

1.2 构件汇交节点设计

构件汇交节点的节点板设计应依照两阶段的设计原则,分别计算节点板在单个杆件连接处及最不利截面处的强度及稳定性。通常情况下,节点板的设计由极限承载力验算控制,因此可直接进行极限承载力的验算。

(1) 单个构件连接的承载力验算

节点板强度验算应首先保证每根杆件与节点板连接处的节点板强度都满足要求,连接的强度可按《钢结构设计规范》^[2] 7.5.1 和 7.5.2 条建议的撕裂线或有效截面(Whitmore 截面)方法进行验算。

(2) 构件合力作用下最不利截面强度验算

节点板同时应满足节点板上连接的所有杆件内力合成作用下,节点板不发生破坏。为此应进行在多个构件合力共同作用下节点板最不利截面内力的验算,最不利截面验算时应考虑杆件的实际受力状态,取杆件截面的屈服荷载,并考虑超强系数作为外加荷载进行验算。

杆件以轴力为主时,节点板的外加荷载可取杆件受压屈曲和受拉屈服时的荷载;对于以弯矩为主的杆件按照全截面受弯屈服荷载确定。

对于压弯、拉弯构件截面屈服后会发生塑性内力重分布,因此,宜通过位移控制进行有限元分析确定截面极限承载力。

(3) 稳定性验算

应尽量通过构造和改变节点板的形状使节点板的稳定性得以保证,以充分发挥节点板的材料强度,避免繁琐的运算。当节点板的稳定性不满足要求时,应参照《钢结构设计规范》^[2] 附录 F 进行节点板的稳定计算。

2 伸臂桁架与巨型柱连接节点设计与构造

2.1 伸臂桁架与巨型柱连接构造

选取上海中心大厦 2 区典型伸臂桁架与巨型柱连接节点,其构造如图 2 所示。伸臂桁架弦杆与腹杆通过节点板汇交,并通过节点板连接于巨型柱钢骨的双腹板。为保证节点区强度,节点板采用 120mm 厚度 Q390GJC 钢板,并将节点板深入巨型柱钢骨内对节点区巨柱钢骨补强。同时,内、外环带桁架也在此处与巨型柱连接,并在环带桁架翼缘对应位置设置填板。本文重点分析伸臂桁架与巨型柱的连接构造,对环带桁架与巨型柱的连接构造不做探讨。

2.2 节点板设计原则及有限元分析

2.2.1 节点板设计原则

伸臂桁架按中震不屈服进行设计,伸臂桁架节点的性能要求应与之相匹配。节点板设计时应首先保证伸臂桁架各个杆件在节点板有足够的锚固强度,计算时可采用 Whitmore 方法或者撕裂线方法确定;其次,还要保证在腹杆及弦杆共同作用下节点板的强度。伸臂桁架弦杆及腹杆的内力在节点区汇交合成后最终通过 g-g 截面传递给巨柱钢骨(图 2)。同时构件的腹板在 g-g 截面处断开,g-g 截面面积最小,因此,需对 g-g 截面进行最不利截面验算。

结构整体分析表明^[4],伸臂桁架构件处于拉弯或压弯复合受力状态。以 2 区设备层伸臂桁架为例,斜腹杆由轴力引起的应力与由弯矩引起的应力之比

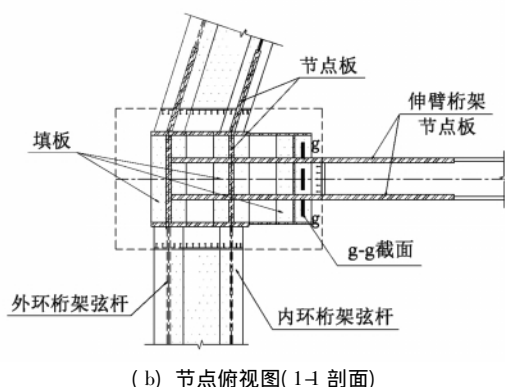
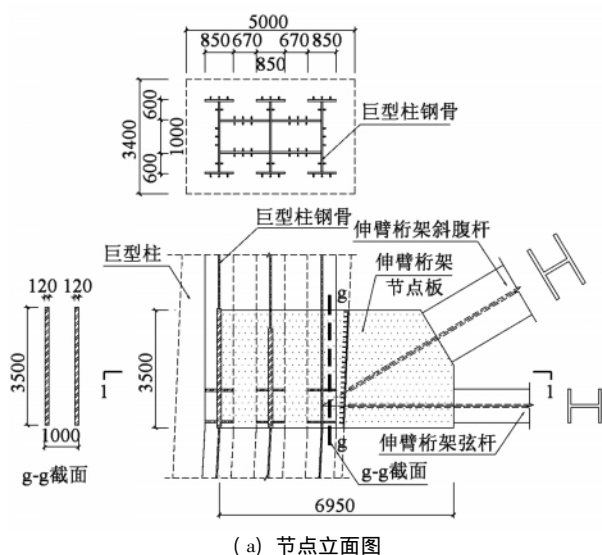


图2 伸臂桁架与巨柱连接节点

Fig. 2 Joint of outrigger to super column

约为2:1;弦杆由轴力引起的应力与由弯矩引起的应力之比约为1:3。节点板内力分析时应按实际的轴力比例计算,如不考虑构件实际受力状态,仅按轴力加载计算节点区应力,会引起节点区应力计算的不准确甚至不安全。 $g-g$ 截面应力可按式(1)~(4)计算。

$$\sigma_N = \frac{\gamma_s N_{hor}}{A_{g-g}} \quad (1)$$

$$\sigma_M = \frac{\gamma_s M_{g-g}}{W_{g-g}} \quad (2)$$

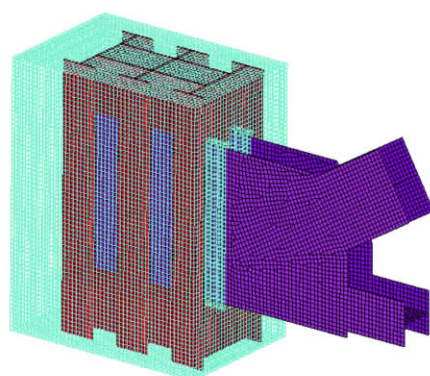
$$\tau = \frac{\gamma_s N_{ver}}{A_{g-g}} \quad (3)$$

$$\sigma_{eq} = \max(\sqrt{(\sigma_N + \sigma_M)^2 + 3\tau^2}, \sqrt{\sigma_N^2 + 6.75\tau^2}) \quad (4)$$

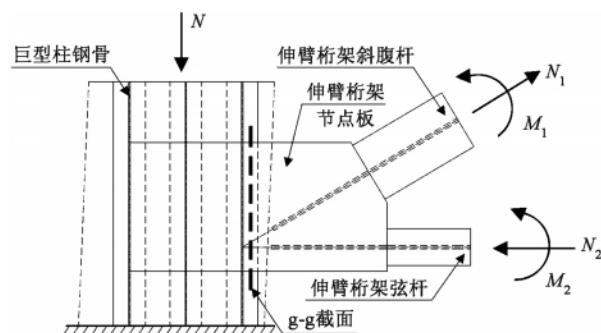
式中: σ_N 、 σ_M 分别为节点板 $g-g$ 截面处轴力和弯矩引起的正应力; τ 为节点板 $g-g$ 截面处的剪应力; N_{hor} 、 N_{ver} 为构件水平向合力及竖向合力; M_{g-g} 为构件合力在 $g-g$ 截面引起的弯矩,计算时应考虑偏心的影响; σ_{eq} 为等效应力; γ_s 为超强系数,对于重要节点 $\gamma_s = 1.2$; A_{g-g} 、 W_{g-g} 分别为 $g-g$ 截面面积和截面弹性抵抗矩。

2.2.2 有限元分析

有限元分析采用ANSYS软件进行,有限元模型如图3a所示。节点板及构件全部采用壳单元,伸臂桁架斜腹杆截面为 $H1000 \times 1700 \times 100 \times 100$,弦杆截面为 $H1000 \times 1000 \times 90 \times 90$,弦杆及腹杆均采用Q345GJC钢材,屈服强度取 325 N/mm^2 ,节点板采用120mm厚度Q390GJC钢材,屈服强度为 350 N/mm^2 。巨型柱混凝土采用三维实体单元模拟,强度等级C70,抗压强度标准值为 44.5 N/mm^2 ,钢骨采用Q345GJC钢材,板厚50mm。有限元加载时按构件实际内力比例加载,并逐渐加载至构件屈服(屈曲)荷载,巨型柱按0.53的轴压比考虑竖向作用,边界条件及加载方式如图3b所示。



(a) 有限元模型



(b) 边界条件及加载方式

图3 有限元模型、边界条件及加载方式示意

Fig. 3 FEA model, boundary and loading conditions

2.2.3 节点安全性评价

图4为加载至杆件屈服时的应力云图,如图所示,节点板绝大部分处于弹性状态,仅在节点板边缘处有少部分屈服。节点板整体应力水平略低于构件应力水平。在节点板下角部和节点板与构件相连部位存在应力集中现象,但应力集中的范围很小,并且节点板以平面受力为主,应力集中区域应力超过屈服强度之后,即形成钝化区域,较小的钝化区域不会影响节点区的整体强度^[5]。

节点试验结果也表明^[6]:伸臂桁架与巨柱连接节点,当加载到中震水平时,塑性区最早出现在伸臂

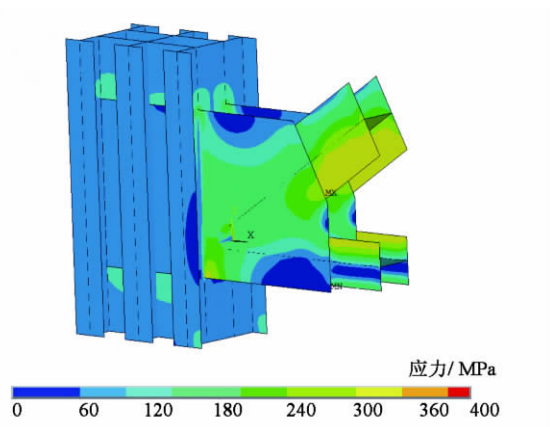


图4 构件屈服时伸臂桁架节点区应力分布云图

Fig.4 Stress contour of joint of outrigger to super column when outrigger yields

桁架边缘区域,与有限元分析结果基本一致。最终破坏表现为伸臂桁架斜腹杆各板件的局部失稳和过大塑性变形,而节点区未发生破坏。因此,认为伸臂桁架与巨柱连接节点设计达到了“强节点,弱构件”的设计要求。

2.2.4 有限元分析与简化式计算结果对比

为验证2.2.1节设计原则的可行性,对g-g截面处有限元计算的应力沿截面高度进行提取,取样点在截面上的位置如图5所示。并将简化式(1)~(4)的计算结果与有限元分析结果进行对比,具体结果见图6。

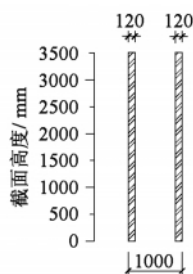
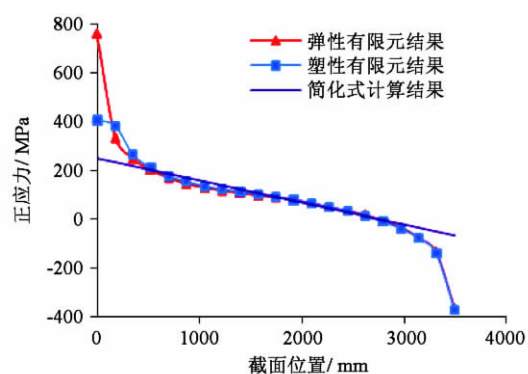


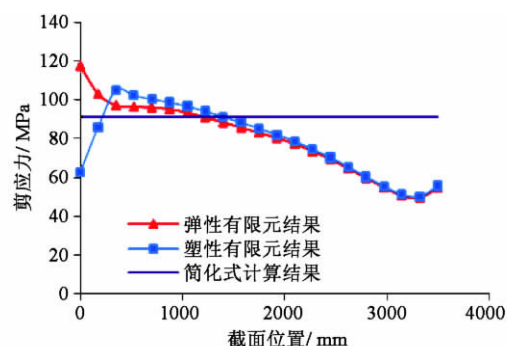
图5 验算截面示意(g-g截面)

Fig.5 Checked section (section g-g)

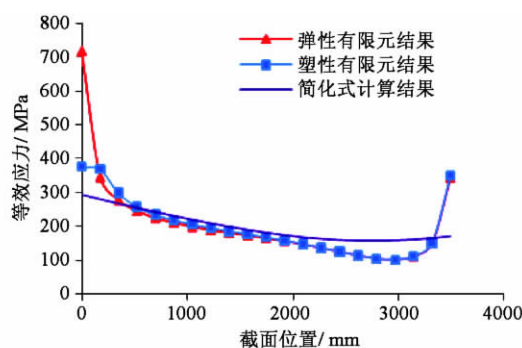
从有限元与简化式计算的截面应力分布情况来看,正应力与等效应力吻合较好,而剪应力误差较大。这主要是由于剪应力并非沿截面均匀分布,而是主要集中在斜腹杆应力的扩散范围内,同时受边界条件影响较大,但按式(3)仍可对截面上剪应力的平均应力水平进行评估,同时按式(4)计算等效应力时考虑到剪应力在截面上的实际分布情况,对剪应力值进行了修正。由于截面应力计算采用的是经典梁理论^[7],而节点板受力状态与计算假定存在差异,同时角部存在应力集中,因此理论计算结果与有限元分析结果有一定误差。总体来说,本文所述计算方法能够反映截面应力分布趋势,且计算结果与数



(a) 正应力



(b) 剪应力



(c) 等效应力

图6 截面应力分布

Fig.6 Stress distribution on section of gusset

值分析吻合较好,其精度能够满足工程设计需要。

值得注意的是,由于节点区应力分布复杂,对于重要结构的节点,有必要对其进行有限元分析^[7]。

3 超长螺栓拼接节点设计与分析

上海中心大厦环带桁架作为结构主要受力构件,承担了外挂幕墙及其上整个分区的次结构重力,对于主体结构的安全意义重大,且其构件截面较大,多为80mm以上超厚板,并多以承受拉力和弯矩为主。为保证现场拼接质量,环带桁架弦杆的拼接采用螺栓连接,如图7所示。

由于环带桁架弦杆内力较大,所需螺栓数量众多,因此造成螺栓排列长度较长,如图8所示。以往

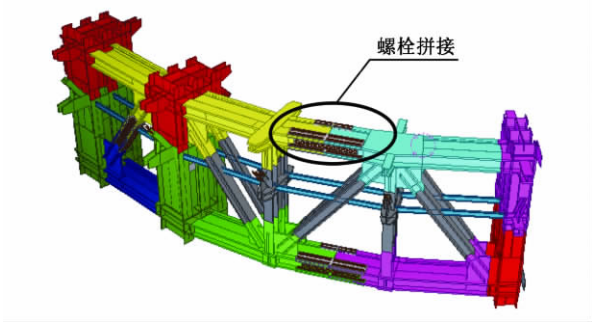


图7 环带桁架螺栓拼接

Fig. 7 Bolt joint of belt truss

研究和工程应用中,虽有对较长螺栓接头的研究,但对此类螺栓数量大、拼接板材厚且长度超长的拼接接头的研究较少^[7]。为验证该类螺栓拼接的可靠性,并分析其工作性能,本文以上海中心大厦1区环带桁架螺栓拼接为例,对其工作性能进行分析。

3.1 超长螺栓的拼接构造

如图8所示,构件截面为焊接H形钢,截面尺寸 $1000\text{mm} \times 800\text{mm} \times 120\text{mm} \times 120\text{mm}$,钢板材质为Q345GJC;腹板拼接板为100mm,翼缘外侧拼接板为80mm,内侧拼接板为90mm,拼接板材质均为Q390GJC;拼接采用M30螺栓摩擦型连接,抗滑移系数取0.45。螺栓数量根据1.1节所述原则确定,共632颗,螺栓轴距100mm,拼接长度4.41m。由于拼接长度超长,螺栓承载力根据《钢结构设计规范》7.2.4条进行了折减。

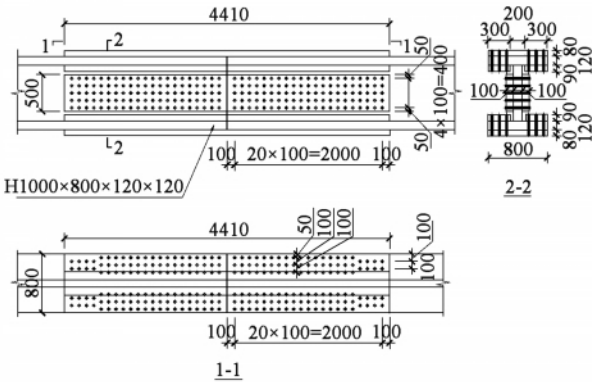
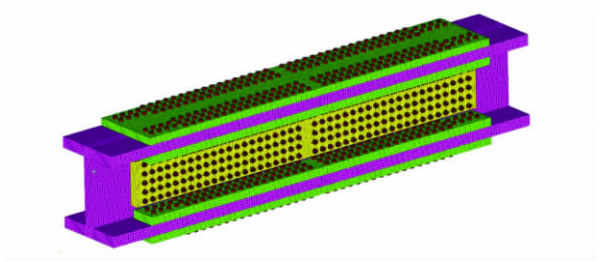


图8 螺栓拼接构造

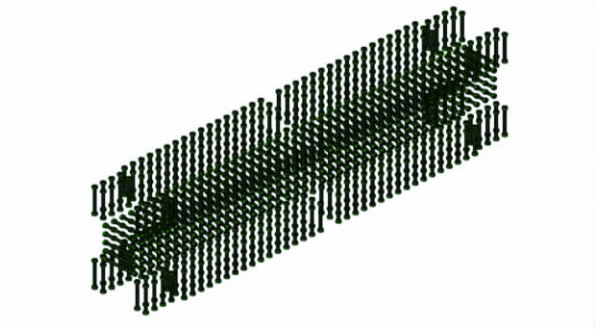
Fig. 8 Details of bolt joint

3.2 有限元分析

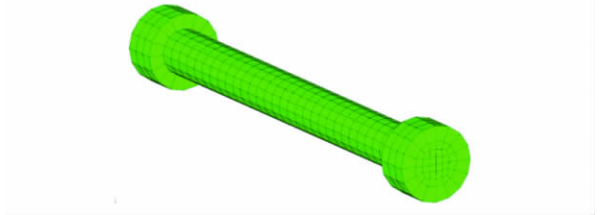
有限元分析采用ABAQUS软件,有限元模型如图9所示。钢板及螺栓建模采用C3D8I三维非协调实体单元,并在螺栓与拼接板以及拼接板与构件之间建立面面接触。对于接触面间的切向作用采用的摩擦模型为库伦摩擦,即采用摩擦系数来表示接触面间的摩擦特性,摩擦系数为0.45。分析时,首先对螺栓施加预紧力,使各构件之间的建立接触关系,然后在构件端部施加轴力或弯矩作用,如图10所示。



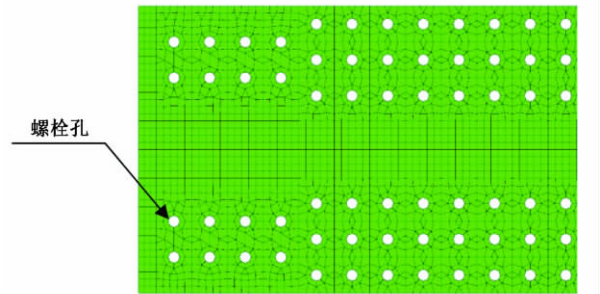
(a) 有限元模型轴侧图



(b) 螺栓分布



(c) 螺栓单元划分



(d) 钢板单元划分(局部)

图9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

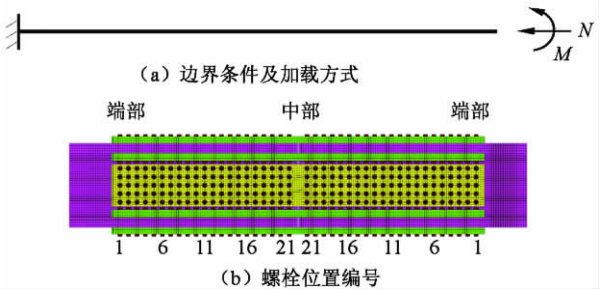


图10 边界条件、加载方式及螺栓位置编号

Fig. 10 Boundary, loading conditions and bolt position number

3.2.1 轴力作用下内力分析

对模型逐步施加轴向荷载至构件截面屈服,观察构件的应力发展过程,发现 H 形钢端部与拼接板中部应力水平较高,截面屈服最早发生在 H 形钢端部螺栓孔周围,构件全截面屈服时的应力状态如图 11a 所示。

从图 11b、11c 中 H 形钢与拼接板的接触摩擦应力分布图可以看出,两侧 H 形钢表面摩擦力关于中部的拼接缝呈对称分布,且拼接缝一侧,呈现螺栓群两端摩擦力较大、中间较小的分布形式。如图 11b、11c 中的橙色和蓝色区域为摩擦力较大区域(蓝色和橙色区域摩擦力大小相等方向相反)。H 形钢与拼接板之间力的传递,主要通过螺栓群两端拼接板与 H 形钢之间的摩擦来完成。

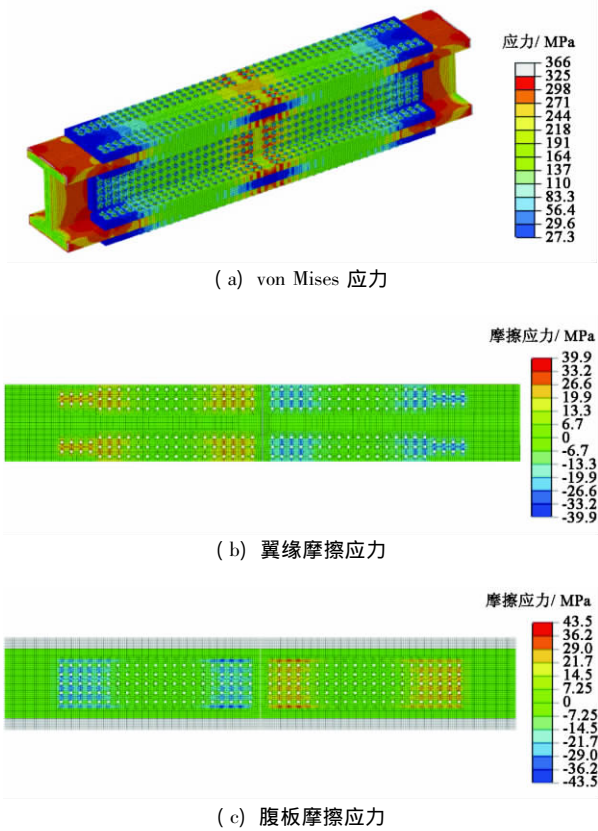


图 11 轴力作用下构件应力分布云图
Fig. 11 Stress contour under axial force

已有研究表明^[7],螺栓接头的传力呈现“两端大、中间小”特点,特别是当螺栓接头长度较长时,这种不均匀性更加明显。图 12 为螺栓接头的实际传力过程。图中, N_i 为各排单个螺栓的传力值;螺栓平均传力值 $N_{v,ave} = F/n$, F 为外荷载, n 为螺栓数目。

从螺栓传力的发展过程可以看出,摩擦型螺栓拼接传力时总是端部螺栓先发挥作用,随着荷载的增大中部螺栓作用逐步发挥,当荷载增大到一定水平,端部螺栓达到其摩擦承载力的最大值,此时端部

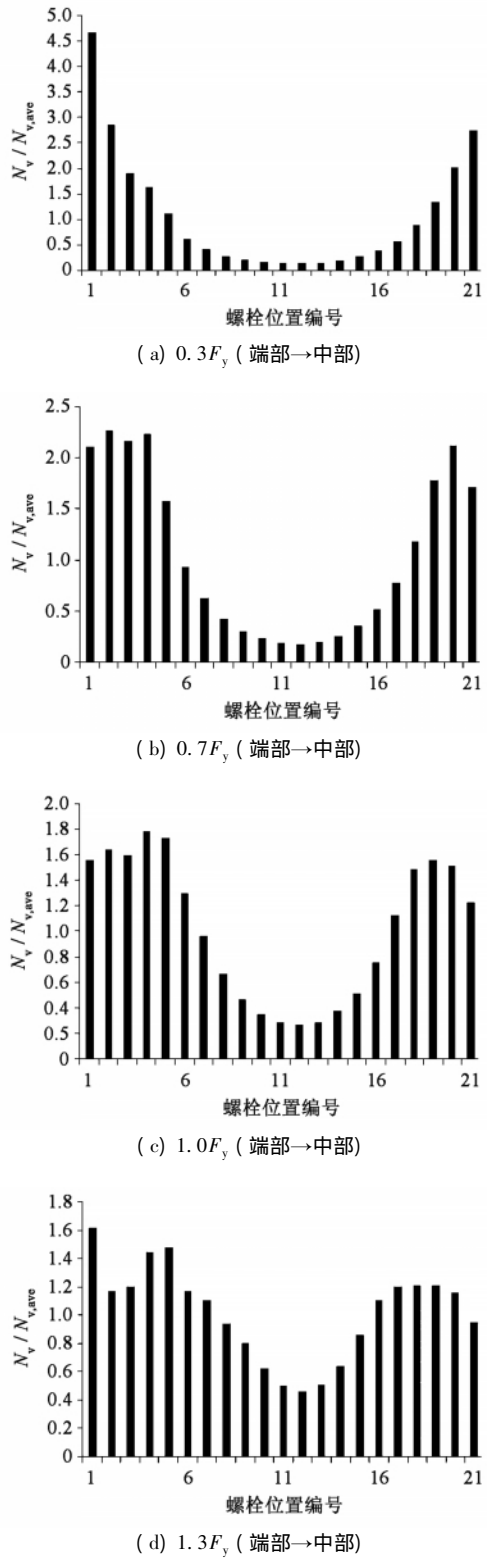


图 12 不同加载水平下螺栓传力比
Fig. 12 Transfer force ratio of bolts at different load level

螺栓受力不再增加,而中部螺栓受力逐渐增加。由表 2 可以看出,当荷载水平较低的时候,受力最大螺栓与受力最小螺栓传力值相差 36 倍左右,随着荷载的增加,这一比值降低到 3.5 倍左右,各排螺栓传力趋于均匀化。当荷载进一步加大,端部螺栓滑移与

表2 螺栓传力比较

Table 2 Comparison of transfer force of bolts

荷载水平	$N_{v\max}/N_{v\min}$	$N_{v\max}/N_{v\text{ave}}$	$N_{v\max}/[N_v]$
$0.3F_y$	36.56	4.68	0.90
$0.7F_y$	13.26	2.24	1.07
$1.0F_y$	7.46	1.79	1.05
$1.3F_y$	3.53	1.48	1.43

注: $N_{v\max}$ 为受力最大螺栓传递的内力值; $N_{v\min}$ 为受力最小螺栓传递的内力值; $[N_v]$ 为高强螺栓摩擦型连接承载力。

钢板孔壁接触,螺栓转变为承压受力状态,端部螺栓传力进一步增大。

3.2.2 弯矩作用下内力分析

拼接接头受弯时的受力状态与轴力下受力状态相似,H形钢端部及拼接板中部应力水平较高,翼缘外侧拼接板较内侧拼接板应力水平偏高,翼缘传力状态为螺栓群两端传力,如图13b。腹板传力呈现周向性,主要集中在螺栓群四角,如图13c所示。

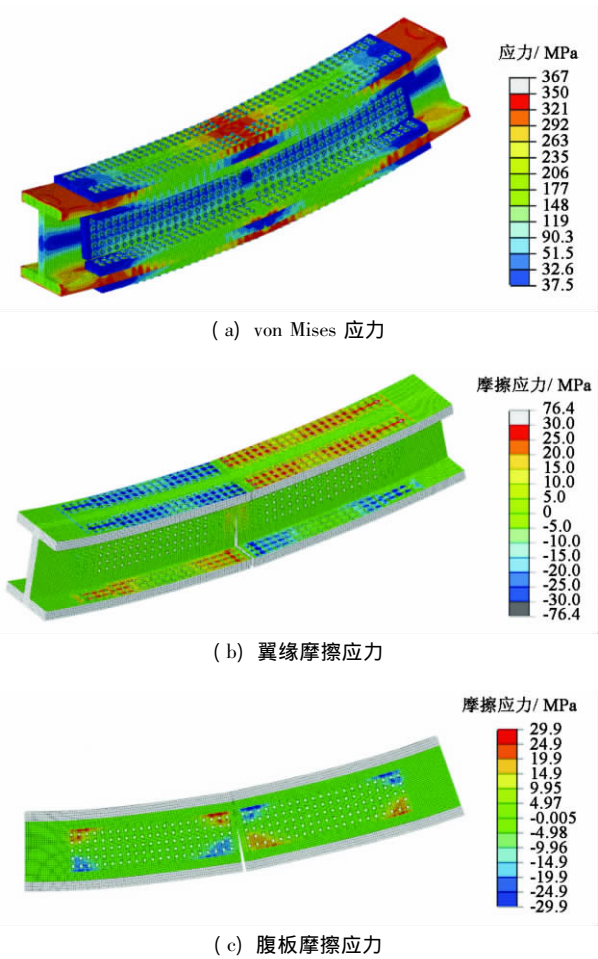


图13 弯矩作用下构件应力分布云图

Fig. 13 Stress contour under bending moment

3.2.3 实际荷载作用下内力分析

为考察螺栓拼接实际荷载工况下的受力状态,对螺栓群按大震不屈服荷载组合:1.0重力荷载代表

值+1.0水平地震作用+0.5竖向地震作用加载,加载后应力分布如图14所示。由于螺栓拼接所选节间处于环带桁架中部,有效地避开了两侧产生的较大端部弯矩。因此,即使在大震工况下该构件螺栓拼接整体应力水平仍较低,整体应力水平小于构件屈服应力的50%,螺栓拼接冗余度较高。

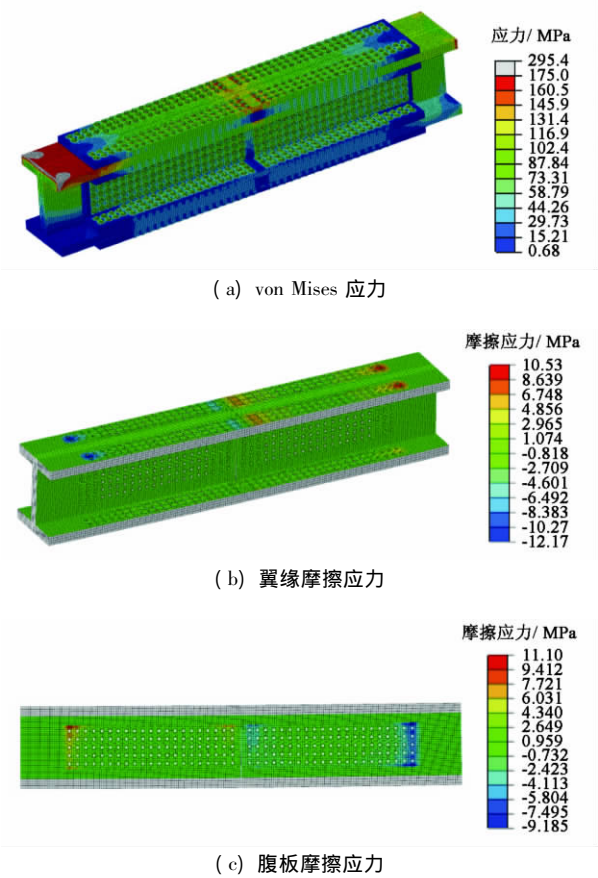


图14 构件在设计内力组合下应力分布云图

Fig. 14 Stress contour under design load combination

3.2.4 拼接对杆件力学特性的影响

与常规较短的拼接接头不同,超长拼接接头所占构件长度比例较大,如图7所示,本工程所选接头已超过构件节间长度70%。

图15为螺栓拼接接头范围内构件的轴向刚度 K_N 与未拼接构件的轴向刚度 K_{N0} 之比以及拼接范围内构件的抗弯刚度 K_M 与未拼接构件的抗弯刚度 K_{M0} 之比在不同荷载水平下的变化趋势。由图15可知,拼接范围内构件的轴向刚度及抗弯刚度均比未拼接构件刚度有一定程度的提高。随着荷载的增大,拼接段的轴向刚度与抗弯刚度均有所降低,当加载到屈服荷载 F_y 时,拼接段轴向刚度与抗弯刚度约为未拼接构件轴向刚度与抗弯刚度的1.5倍。因此可知,当螺栓拼接长度较长时将改变构件的力学特性,从而影响构件的受力状态。

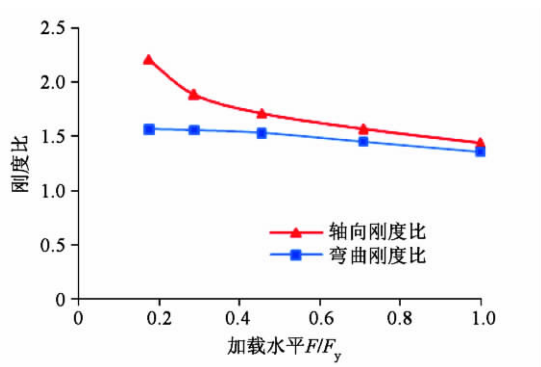


图 15 构件刚度变化曲线

Fig. 15 Stiffness curves of members

4 结论

(1) 伸臂桁架与巨型柱连接节点简化式计算结果与有限元计算结果吻合较好,能够满足工程精度要求,可以用来进行该类复合受力构件连接节点初步设计验算。

(2) 超长螺栓拼接满足指定性能需求下的承载力设计要求,拼接设计具有较高的冗余度。螺栓传力呈现“两端大、中间小”的受力性态,随着荷载的增加螺栓传力不均匀性降低。

(3) 螺栓拼接长度较大时,对构件的力学特性会有一定的改变,设计时应引起注意。

参 考 文 献

[1] 丁洁民,巢斯,赵昕,等. 上海中心大厦结构分析中若干关键问题[J]. 建筑结构学报,2010,31(6): 122-131. (DING Jiemin ,CHAO Si ZHAO Xin et al.

Critical issues of structural analysis for the Shanghai Center project[J]. Journal of Building Structures , 2010 ,31(3):122-131. (in Chinese))

- [2] GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. (GB 50017—2003 Code for design of steel structures[S]. (in Chinese))
- [3] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. (GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. (in Chinese))
- [4] Thornton Tomasetti , TJADRI. Report on special examination of earthquake fortification in preliminary design of the Shanghai Center[R]. Shanghai: Architectural Design & Research Institute of Tongji University (Group) Co. ,Ltd 2009.
- [5] 包联进,姜文伟,孙战金,等. CCTV 新台址主楼外筒关键节点设计与构造[J]. 建筑结构学报,2008,29(3): 82-87. (BAO Lianjin ,JIANG Wenwei , SUN Zhanjin ,et al. Detailed design of key joints of the external tube in New CCTV Building [J]. Journal of Building Structures , 2008 , 29 (3): 82-87. (in Chinese))
- [6] 同济大学建筑工程系. 上海中心项目关键节点试验研究初步报告[R]. 上海: 同济大学,2010. (Building Engineering Department ,Tongji University. Preliminary research report of experimental study on the key joint of Shanghai Tower [R]. Shanghai: Tongji University 2010. (in Chinese))
- [7] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社,2005. (Chen Shaofan. Principles of steel structure design[M]. Beijing: Science Press , 2005. (in Chinese))