

荷兰 Venlo 型温室结构抗震性能分析

李一哲, 骈超*

(中国建材国际工程集团有限公司, 上海 200063)

摘要: 为了研究地震作用对依据荷兰规范设计的 Venlo 温室结构安全性的影响, 该研究以荷兰公司设计的山东某 Venlo 型温室为例, 利用有限元软件 MIDAS Gen, 采用振型分解反应谱法对设防烈度分别为 7 度 (0.10 g)、7 度 (0.15 g)、8 度 (0.20 g) 和 8 度 (0.30 g) 的温室整体结构进行模拟计算, 对结构的周期、振型、应力和位移进行了分析探讨。结果显示, 温室整体的最长自振周期为 1.75 s, 表现为较柔性的结构体系, 前 2 阶振型分别为 Y、X 向的平动, 在 2 个主轴方向上具有相近的抗震性能。不同设防烈度下, 结构的承载力最大值均为 216.96 MPa, 由风荷载控制, 最大应力小于构件屈服强度。当设防烈度为 8 度 (0.30 g) 时, X 向地震作用对构件的拉、压应力最大, 分别为 211.95 和 196.02 MPa。无地震参与的荷载组合中 X 向风荷载产生的位移最大, 达到 31.80 mm。在地震参与的荷载组合中, 柱顶最大位移为 61.84 mm, 结构变形主要受地震荷载的影响, Y 向地震作用超过同工况下 X 向地震作用约 11.6%。结论表明, 引进的荷兰温室在地震设防烈度不高于 8 度 (0.30 g) 时, 构件始终处于弹性范围内, 满足规范要求, 但最大变形超过了中国建筑抗震设计对弹性层间位移角 1/250 的要求。最后, 该文对中国农业温室结构设计标准的编制提出了一些建议。

关键词: 温室; 结构; 地震; 设防烈度; 有限元; Venlo

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.028

中图分类号: S625.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-19-0243-07

李一哲, 骈超. 荷兰 Venlo 型温室结构抗震性能分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 243-249.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.028 <http://www.tcsae.org>

Li Yizhe, Pian Chao. Seismic performance analysis of Dutch Venlo greenhouse structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 243-249. (in Chinese with English abstract)

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.19.028 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着中国农业现代化规模的不断扩大, 中国正广泛引进和建设以荷兰为代表的 Venlo 型现代化农业温室。荷兰的 Venlo 型温室已经成为使用面积最大、数量最多、应用最广的玻璃温室, 拥有大型温室先进的装备技术和设计体系^[1-3]。中国对于现代化农业温室结构的研究已经起步, 已颁布的标准大多为行业标准或团体标准, 有关温室结构设计的国家标准较少, 引进的荷兰温室结构的安全性和适用性已经引起业内的关注^[4-6]。

目前关于温室结构安全性的研究主要集中在风、雪荷载^[5-7], 对其抗震性能的研究较少。这是由于温室结构较轻, 覆盖材料又为轻质材料, 通常认为结构受地震的影响小于风荷载^[8-10], 风荷载在结构设计中起主要控制作用, 因此在多数研究中^[9-12]不考虑地震荷载的组合。少量有关温室抗震的研究, 如韩宏昌^[13]对银川市某 Venlo 型温室进行多遇地震下的动力时程分析, 结果显示在实际地震作用下柱脚和纵向桁架底部应力较大, 在横向地震波下桁架产生较大变形, 但未发生结构破坏。戴素娟等^[1]提出将加腋异型节点应用于温室结构中, 并针对该节点

抗震性能利用有限元软件进行研究, 结果表明加腋异型节点能更有效提高节点的屈服荷载和抗震性能; 李晓润等^[2]提出了一种温室结构楔形箱型矩管柱与 H 型钢梁连接节点构造型式, 并针对该节点抗震性能利用有限元软件进行研究, 结果表明新型节点的耗能能力明显优于传统外联板式节点, 具有良好的抗震性能; 李丛权等^[3]设计了一种玻璃温室防震结构, 并通过缩尺模型试验验证了该防震结构可以显著提高温室的抗震性能; Dova 等^[14]对从法国直接引进到希腊的 Venlo 型温室进行地震作用分析, 结果表明结构柱过早横向扭转屈曲, 格构梁中间与天沟垂直支撑连接处的构件发生屈服, 并指出在地震高烈度区进行温室结构设计时应当考虑地震的影响。这些研究主要以温室的单榀结构或局部节点作为研究对象, 并未对整体温室结构的抗震性能进行研究。此外, 将空间结构体系简化为平面单榀框架后, 忽略了空间效应的相互作用和覆盖材料对整体结构刚度的有利影响。金健等^[15]通过建立 Venlo 型温室结构的平面简化模型、空间框架模型和空间蒙皮模型, 分析了在水平荷载和竖向荷载方向的空间作用与蒙皮作用对结构的影响, 结果表明覆盖材料为玻璃的温室具有较高的蒙皮作用, 可有效提高抗侧刚度, 并减小结构形变。该结果与丁敏等^[16-17]对 Venlo 型温室结构的单榀骨架、整体骨架、整体骨架覆盖材料在风雪荷载工况下的分析结果基本相同。

中国地域辽阔, 近一半的国土面积处于高烈度区 (7 度以上), 若直接引进荷兰设计的温室或采用荷兰的设

收稿日期: 2021-07-06 修订日期: 2021-09-13

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目 (19200730800)

作者简介: 李一哲, 研究方向为钢结构设计及有限元分析。

Email: liyizhe@ctiec.net

*通信作者: 骈超, 博士, 研究方向为工程结构抗震及减隔震。

Email: pianchao@ctiec.net

计标准, 存在地震作用破坏主体结构的安全隐患, 并且国内已有地震造成温室倒塌的案例和报道, 例如汶川地震造成 5 万个温室大棚倒塌^[18]。因此, 本文采用有限元软件 MIDAS Gen 对荷兰公司设计的山东某 Venlo 型温室的整体结构进行抗震计算, 考虑覆盖材料的蒙皮效应对结构刚度的影响, 对温室的寿命周期、振型以及在不同地震设防烈度下结构的最大应力和最大位移进行分析, 并将位移结果与欧洲、中国规范规定的限值进行比较, 为中国农业温室结构设计和相应规范的编制提供参考。

1 Venlo 型温室结构

Venlo 型温室结构轻、刚度小, 受风、雪荷载影响较大^[5,19]。目前从荷兰引进国内的 Venlo 型温室主要为 A15 类加热温室^[20-21], 设计使用年限为 15 a, 跨长 8.0 m, 开间 5.0 m, 桁架高 0.5 m, 檐口高 6.0 m, 屋脊高 6.8 m。该研究采用有限元计算软件 MIDAS Gen, 以山东某设施农业温室为例建立结构模型, 温室总长 265 m, 宽 240 m, 以种植番茄为主。温室种植区的 X、Y 方向分别为格构梁和铝合金天沟的布置方向, 中间道路两旁的钢立柱每开间地基下降 10 mm 埋设, 便于天沟导流雨水, 顺高差汇集向温室两侧。斜拉筋主要沿着温室迎风面、背风面和中间道路两侧的第二、第三开间布置, 以保证温室的侧向稳定性。温室的空间结构模型如图 1 所示。

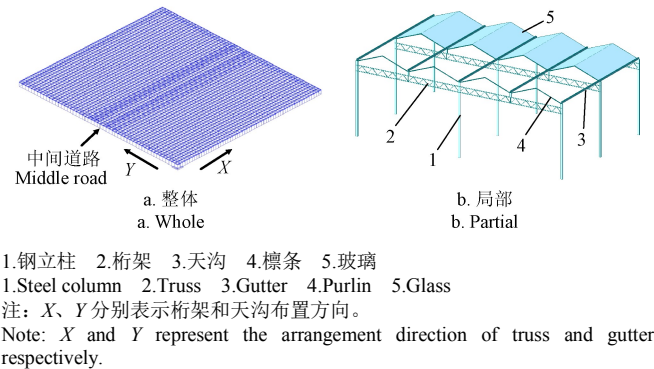


图 1 荷兰 Venlo 型温室结构模型
Fig.1 The structural model of the Dutch Venlo greenhouse

2 数值模拟

2.1 单元选取

MIDAS Gen 中的梁单元由 2 个节点构成, 具有拉、

压、弯、剪、扭的刚度, 考虑剪切变形, 适用于等截面或变截面的梁与柱构件模拟, 用于模拟温室钢立柱、天沟、地基梁、桁架弦杆和腹杆等。由于天沟截面为异形截面, 如图 2 所示, 因此天沟的截面形状通过 AutoCAD 导入至 MIDAS Gen 中生成, 从而准确模拟天沟结构构件的力学性能。厚板单元由同一平面上的四节点或三节点组成, 可以解决平面张拉、平面压缩、平面剪切、及平板沿厚度方向的弯曲及剪切等结构问题, 用于模拟覆盖温室的浮法玻璃。

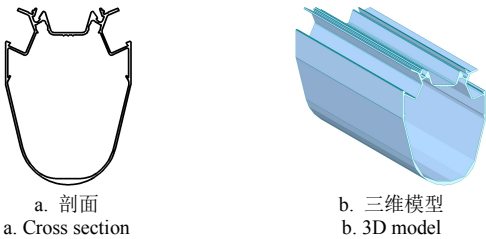


图 2 温室天沟结构模型
Fig.2 The structural model of the gutter

2.2 材料特性

为合理化利用钢材并满足设计的经济性, 在荷兰温室结构中, 钢材的选型并非统一, 钢结构立柱均采用 S235JR, 而桁架上下弦杆和支撑铝合金天沟的短柱采用 S275JR。温室中主要构件类型、尺寸和材料特性见表 1。

2.3 边界条件

温室结构中钢立柱是竖向荷载的重要传力构件, 温室屋面所受荷载及作物荷载等通过格构梁和天沟传至立柱, 再由立柱传至混凝土基础。立柱与基础的连接形式直接影响立柱的内力分布^[22]。实际建造中, 荷兰 Venlo 型温室的四周边柱底部通过螺栓锚固在地基梁上, 工程中可简化为刚接; 其余钢立柱底部通过柱脚螺栓单向固定在基础顶面, 可简化为单向铰接; 格构梁、钢立柱、天沟等金属构件之间均采用螺栓固定连接, 可简化为铰接。因此, 在本文的模型中, 约束四周边柱与基础梁连接节点的全部自由度, 仅释放中间钢立柱与基础连接节点处绕 Y 方向的旋转自由度和各金属构件连接节点的旋转自由度。此外, 温室的覆盖玻璃采用铝合金型材镶嵌式安装, 且由于玻璃自身提供一定刚度, 考虑玻璃的蒙皮作用对整体结构刚度的影响, 可简化为刚接形式, 约束覆盖玻璃与相邻构件之间的全部自由度^[15]。

表 1 温室结构主要构件类型、尺寸及材料特性

Table 1 Type, size and material characteristic of main member for greenhouse structure

材料 Material	类型 Type	构件 Member	截面尺寸 Cross-section size/mm	弹性模量 Elasticity modulus/MPa	泊松比 Poisson's ratio	屈服强度 Yield strength/MPa
结构钢 Structural steel	S235JR	中间立柱	140×60×3	2.1×10 ⁵	0.3	235
		路两边立柱	140×60×4			
		迎风面、背风面立柱	140×60×5			
		两侧山墙立柱	180×180×5			
		斜腹杆	25×25×1.5			
	S275JR	斜拉筋	10			-
		上下弦杆	120×60×3			275
铝合金 Aluminum alloy	-	天沟、玻璃檩条	145×100×2	7.0×10 ⁴	0.3	260
浮法玻璃 Float glass	-	屋顶	5	7.2×10 ⁴	0.2	-

注: “-”代表未知或无此项。
Note: “-” means unknown or no item.

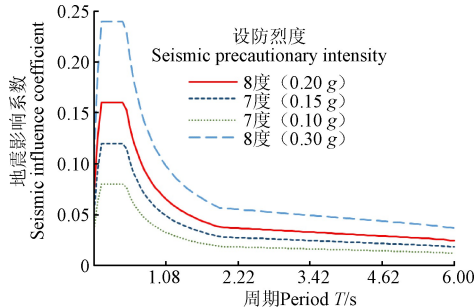
2.4 荷载工况

2.4.1 荷载类型

温室结构所承受的荷载主要来自永久荷载 (G_k)、风荷载 (Q_{k1})、雪荷载 (Q_{k2})、作物荷载 (Q_{k3})、施工检修集中荷载 (Q_{k4})、移动设备荷载 (Q_{k5})和地震作用 (A_{kE})。

温室所施加的荷载大小参考欧洲温室标准^[20]和荷兰温室标准^[21]的计算方法。该温室工程所处 II 类场地类型,基本风压、雪压均按重现期 R 为 50 a 的值采用^[23],永久荷载取构件自重,风荷载取 0.2~1.6 kN/m²,雪荷载取 0.26 kN/m²,作物荷载取 0.15 kN/m²,施工检修集中荷载取 1.5 kN,移动设备荷载取 6.0 kN。

为了比较荷兰温室结构在中国不同设防烈度下的抗震性能,按照中国建筑抗震设计规范^[24]中的多遇地震考虑,选择地震分组第二组,场地类别 II 类,设防烈度分别为 7 度 (0.10 g)、7 度 (0.15 g)、8 度 (0.20 g) 和 8 度 (0.30 g),采用振型分解反应谱法进行不同设防烈度下的抗震分析,地震反应谱见图 3。



注: g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$ 。
Note: g is the gravitational acceleration, $m \cdot s^{-2}$ 。

图 3 多遇地震下的反应谱比较

Fig.3 Comparison of response spectra under frequently occurred earthquake

2.4.2 荷载组合

欧洲温室标准规定^[20],处在地震高烈度区的国家(如德国、意大利、希腊),必须考虑地震作用下永久荷载和雪荷载的基本组合形式(简称 d1),以及在 d1 基础上增加作物荷载的基本组合形式(简称 d2),而荷兰地区远离地震带,标准中的荷载工况不考虑地震的影响^[21]。为了统一组合形式,本文增加地震作用参与的荷载组合 d1、d2 进行计算,基本组合公式如表 2 所示。

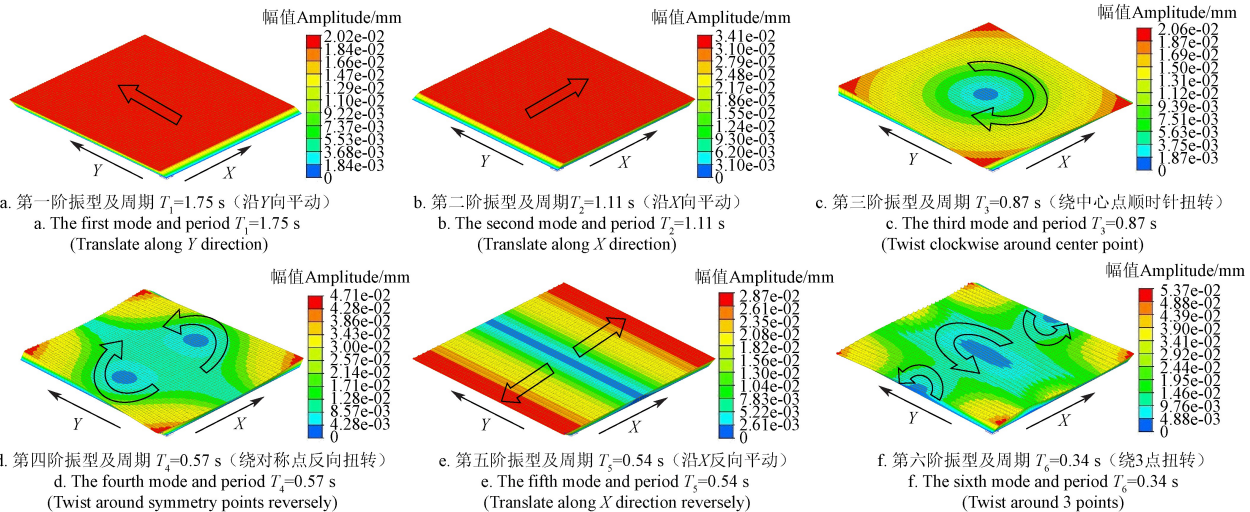


图 4 温室结构前 6 阶振型图

Fig.4 The first six modes of the greenhouse structure

表 2 温室荷载组合

Table 2 Load combination for greenhouse

荷载组合编号 Load combination No.	规范来源 Source of specification	组合公式 Combination formula
a1	荷兰	$S_{a1} = \gamma_G G_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \psi_{Q2} \gamma_{Q2} Q_{k2} + \psi_{Q3} \gamma_{Q3} Q_{k3}$
a2	荷兰	$S_{a2} = \gamma_G G_k + \psi_{Q1} \gamma_{Q1} Q_{k1} + \gamma_{Q2} Q_{k2} + \psi_{Q3} \gamma_{Q3} Q_{k3}$
b1	荷兰	$S_{b1} = \gamma_G G_k + \gamma_{Q1} Q_{k1}$
c1	荷兰	$S_{c1} = \gamma_G G_k + \psi_{Q3} \gamma_{Q3} Q_{k3} + \gamma_{Q4} Q_{k4} + \psi_{Q5} \gamma_{Q5} Q_{k5}$
c2	荷兰	$S_{c2} = \gamma_G G_k$
d1	欧洲	$S_{d1} = G_k + \psi_{Q3} Q_{k3} + \gamma_{AE} A_{kE}$
d2	欧洲	$S_{d2} = G_k + \psi_{Q2} Q_{k2} + \psi_{Q3} Q_{k3} + \gamma_{AE} A_{kE}$

注: S 代表相关荷载作用效应值。 G_k 代表永久荷载, kN; Q_{k1} 代表风荷载, (kN·m⁻²); Q_{k2} 代表雪荷载 (kN·m⁻²); Q_{k3} 代表作物荷载 (kN·m⁻²), Q_{k4} 代表施工检修集中荷载、 Q_{k5} 代表移动设备荷载, kN; A_{kE} 代表地震作用。 γ 、 ψ 分别表示相应荷载对应的分项系数和组合系数。
Note: S represents value of the relevant load effect. G_k means permanent load, kN; Q_{k1} means wind load, (kN·m⁻²); Q_{k2} means snow load, (kN·m⁻²); Q_{k3} means crop load, (kN·m⁻²); Q_{k4} means concentrated vertical load and Q_{k5} incidentally-present installation load, kN. γ and ψ represent the partial factor and combination coefficient of the load, respectively.

3 结果与分析

3.1 周期与振型

钢结构建筑的第一阶基本自振周期可根据建筑总层数近似地估计^[25]:

$$T_1 = (0.10 \sim 0.15) n$$

式中 n 表示建筑总层数。

一般建筑层高 2.7~3.0 m,本文中温室的模型总高 6.8 m,可按 2.5 层建筑进行估算,得到第一阶自振周期为 0.25~0.38 s,远小于温室模型的第一阶周期 1.75 s,说明温室主体结构周期较长,表现出较为柔性的结构体系。从振型质量参与系数来看,温室模型前 6 阶振型的质量参与系数为 X 向 99.81%, Y 向 99.56%。当温室模型的振型参与质量超过总质量的 90%^[24],振型均参与地震作用,因此,本文选择具有代表性的前 6 阶振型进行分析,如图 4 所示。从振型图来看,第一阶振型为 Y 向平动,第二阶振型为 X 向平动,从第三阶振型开始出现扭转,质量中心与刚度中心基本重合,第四阶至第六阶振型表现出平扭对称性,整体结构具有较规则的刚度分布和较强的抗扭转能力。

3.2 应力比较

欧洲规范的抗力分项系数是根据构件截面或破坏模式分类, 根据欧洲规范计算的轴心受拉、受压构件的安全水平均高于中国规范计算的结果^[26]。根据欧洲规范推荐的抗力分项系数 γ_M , 荷兰取 1.0 计算, 温室结构钢材 S235JR、S275JR 的强度设计值分别按照 235 和 275 MPa 考虑。温室结构的有限元计算结果显示, 在所有荷载组合中, b1(wx)组合下构件的拉应力最大,

即包络值 216.96 MPa, 而地震作用产生的最大拉应力为 211.95 MPa, 低于 X 向风荷载参与荷载组合时的最大应力。d2(Rx)组合对构件的压应力始终最大, 在设防烈度为 7 度 (0.10g) 时压应力为 168.91 MPa, 并随设防烈度的提高增加至 196.02 MPa。结构构件的最大拉、压应力均未超过钢材的强度设计值, 满足设计要求。不同设防烈度下的各荷载组合计算结果如表 3 所示。

表 3 不同设防烈度下的荷载组合应力值
Table 3 The combined stress value of load under different seismic precautionary intensity

荷载组合 Load combination	最大拉应力 Maximum tension stress				最大压应力 Maximum compressive stress			
	设防烈度 Seismic precautionary intensity				设防烈度 Seismic precautionary intensity			
	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g
al(wx)			213.12				149.67	
al(wy)			87.05				75.85	
a2			185.67				156.12	
b1(wx)			216.96				118.74	
b1(wy)			169.83				72.61	
c1			138.22				134.90	
c2			139.28				135.79	
d1(Rx)	123.02	127.53	132.05	141.08	103.24	107.71	112.87	157.42
d1(Ry)	114.64	115.09	115.55	116.45	97.84	99.79	101.74	109.33
d2(Rx)	193.89	198.41	202.92	211.95	168.91	175.68	182.46	196.02
d2(Ry)	185.32	185.78	186.23	187.13	155.69	156.02	156.35	157.01
包络 Envelope	216.96	216.96	216.96	216.96	168.91	175.68	182.46	196.02

注: wx、wy 分别代表 X、Y 方向的风荷载参与荷载组合; Rx、Ry 分别代表 X、Y 方向的地震作用参与荷载组合; 包络代表荷载组合中 X、Y、Z 方向的组合最大值, 下同。
Note: wx and wy represent the wind load which participate in the load combination in X and Y directions respectively; Rx and Ry represent the load combination of the seismic action in X and Y directions respectively. The envelope represents the combined maximum value of the X, Y and Z directions in the load combination. The same as follows.

由表 3 可知, X 向风荷载对温室结构产生的拉应力起主要控制作用。b1(wx)在所有荷载组合中拉应力最大, 主要发生在温室 X 向迎风面靠近边柱的第一跨中, 位于桁架内支撑天沟短柱的竖直腹杆与桁架上弦杆相连的节点处, 如图 5a 所示。这是由于风荷载体形系数在迎风坡的第一跨屋面最大, 产生的风荷载也较大^[27]。对比 al(wx)可知, 二者相差 3.84 MPa, 是由于作物荷载的竖向力抵消了一部分风荷载在屋面产生的吸力, 减小了构件约 1.7%的最大拉应力。

从表 3 还可以看出, 温室构件的最大压应力始终由 X 向地震荷载工况 d2(Rx)控制。7 度 (0.15 g) 及以上设防烈度下的最大压应力均出现在 X 向迎风坡第一跨中间位置, 主要集中在温室道路两旁的桁架跨中, 支撑天沟短柱的竖直腹杆与桁架上弦杆相连的节点位置受到挤压, 最大压应力集中在两相邻上弦杆连接处。以 8 度 (0.30 g) 为例, 最大压应力的位置如图 5b 所示。

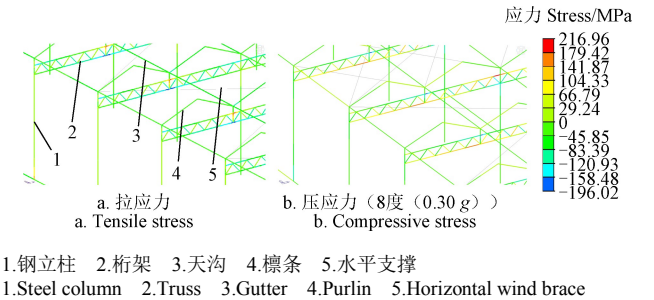


图 5 最大应力云图
Fig.5 Maximum stress nephogram

根据计算结果可知, 在组合系数不同的情况下, c1 和 c2 工况下的最大应力基本相同, 相差不超过 1%, 在无风、雪荷载的参与下, 永久荷载产生的最大应力基本不受其他活荷载组合的影响。当雪荷载、作物荷载与 X 向地震作用共同存在时, 产生的拉、压应力均大于与 Y 向地震作用组合的工况, 最大应力的连接节点处采用的钢材强度高于其他构件。此外, 无论在何种工况下, Y 向荷载对结构产生的应力均低于 X 向。图 6 展示了 X 向风荷载与地震荷载参与组合的各工况下的结构最大拉压应力, 对比分析可见, 在不同抗震设防烈度下, 风荷载组合产生的拉应力始终高于地震作用, 温室结构的拉应力由 X 向风荷载控制; 而地震荷载参与的组合对结构的压应力起主要控制作用, 并随地震烈度的增加而明显增大, 但均未超过拉应力大小。

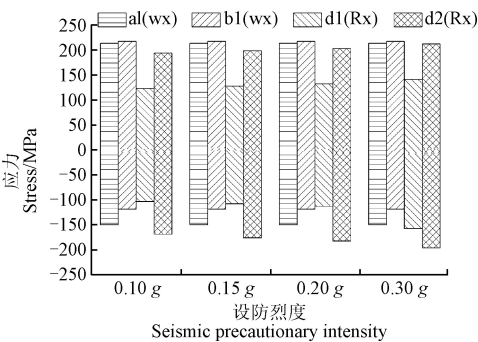


图 6 地震作用与风荷载的应力比较
Fig.6 Comparison the stresses of seismic action and wind load

综上所述，在不同设防烈度下，温室结构的承载力设计主要受风荷载控制，结构的抗压强度受地震作用的控制较为明显，构件的最大应力均小于材料设计强度，结构始终处于弹性范围内，满足承载力设计的要求。

3.3 位移比较

欧洲和荷兰的温室标准中规定，A 类温室应同时满足承载力极限状态和正常使用极限状态，温室立柱柱顶水平位移的限值应满足要求：1) 小于天沟距地面高度的 1/75；2) 当风荷载参与作用时，小于 60 mm^[21-22]。根据计算结果可知，无地震参与的荷载组合中 a1(wx)的最大位移为 31.80 mm，超过同工况下 Y 向风荷载作用约 30%。在地震参与的荷载组合中，柱顶最大位移为 61.84 mm，Y 向地震作用超过同工况下 X 向地震作用约 11.6%。全部荷载工况下的柱顶最大水平位移均满足对应规范的要求，不同设防烈度下产生的柱顶最大位移见表 4。

表 4 不同设防烈度下柱顶的最大位移

Table 4 Maximum displacement of column under different seismic precautionary intensity

荷载组合 Load combination	设防烈度 Seismic precautionary intensity			
	0.10 g	0.15 g	0.20 g	0.30 g
a1(wx)		31.80		
a1(wy)		22.22		
a2		14.05		
b1(wx)		31.03		
b1(wy)		21.63		
c1		12.04		
c2		12.10		
d1(Rx)	18.92	26.75	34.66	50.61
d1(Ry)	21.54	31.04	40.95	61.04
d2(Rx)	23.52	31.08	38.88	54.66
d2(Ry)	24.49	33.19	42.46	61.84
包络 Envelope	31.80	33.19	42.46	61.84

为了比较风荷载与地震作用对结构位移的影响，选择风荷载参与组合产生最大位移的工况与不同烈度下的地震组合工况进行对比。从图 7 可以看出，荷载工况 d1、d2 在 Y 向地震作用产生的位移在 7 度 (0.15 g) 开始逐渐高于 X 向地震作用，位移相差逐渐增大，而 Y 向地震作用下的位移随着设防烈度的提高基本趋于一致。当设防烈度小于 7 度 (0.15 g) 时，结构位移由风荷载起主导作用，当设防烈度提高至 8 度 (0.20 g) 及以上时，地震作用成为主要控制因素，柱顶最大位移始终大于风荷载作用产生的位移。

通过对比分析，风荷载仅在 7 度 (0.10 g) 时起控制作用，但随着设防烈度的提高，地震作用产生的位移逐渐增大，结构位移主要由 Y 向地震控制。全部荷载工况下的最大位移均满足欧洲、荷兰温室标准的要求，但均超过了中国建筑抗震设计^[24]中规定的弹性层间位移角 1/250 的限值，不满足建筑抗震变形对侧向刚度验算的要求。

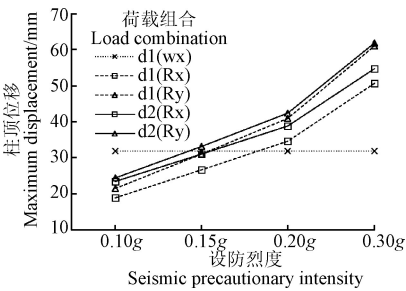


图 7 地震作用与风荷载的位移比较

Fig.7 Comparison of the displacements of seismic action and wind load

4 结 论

本文对荷兰 Venlo 型温室结构进行不同设防烈度下的抗震性能分析，主要研究结论及建议如下：

1) 温室整体结构自振最长周期为 1.75 s，表现出较为柔性的结构体系，振型体现出温室结构较规则的刚度分布，两个主轴方向上的抗震性能相近。

2) 在进行温室结构承载力设计时，风荷载起主要控制作用，最大应力 216.96 MPa，未超过构件屈服强度，可不进行抗震验算。但对于温室中细长杆件来说，在进行结构稳定性和变形验算时，建议考虑地震作用的影响，并适当增加基本抗震构造措施。

3) 在高烈度区 (超过 7 度 (0.10 g))，地震作用对结构位移起主要控制作用，最大位移 61.84 mm 不满足中国建筑抗震设计中结构侧向位移角 1/250 的限值要求。建议中国在编制农业温室结构设计规范时，可参考欧洲、荷兰的温室设计标准，针对温室特殊的柔性结构体系，适当放宽地震作用下结构位移角的限值，以满足 Venlo 型温室结构在中国地震高烈度区的适应性。

本文针对 Venlo 型温室的单一类型进行了分析，不同跨度、开间以及所处不同地理环境对温室抗震性能的影响还需要更深入的研究。

[参 考 文 献]

[1] 戴素娟, 侯世谨, 赵新伟, 等. 多功能观光温室结构加腋异型节点抗震性能研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(7): 40-44.
Dai Sujuan, Hou Shijin, Zhao Xinwei, et al. Study on seismic behavior of irregular joints with welded haunch multi-purpose sightseeing greenhouse structures[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(7): 40-44. (in Chinese with English abstract)
[2] 李晓润, 宋波, 陈水荣. 观光温室结构楔形箱型矩管柱梁连接节点抗震性能[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 252-257.
Li Xiaorun, Song Bo, Chen Shuirong. Seismic performance of wedge-shaped box joint of beam and box column in tourism greenhouse structures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 252-257. (in Chinese with English abstract)
[3] 李从权, 王庆惠, 马月虹. 玻璃温室防震设计与模型试验[J].

- 湖北农业科学, 2019, 58(20): 164-167, 189.
- [4] 齐飞, 周新群, 张跃峰, 等. 世界现代化温室装备技术发展及对中国的启示[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 279-285.
Qi Fei, Zhou Xinqun, Zhang Yuefeng, et al. Development of world greenhouse equipment and technology and some implications to China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 279-285. (in Chinese with English abstract)
- [5] 童乐为, 金健, 周锋. 中欧温室规范中风荷载取值的对比[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 174-181.
Tong Lewei, Jin Jian, Zhou Feng. Comparative study on calculation of wind loads on greenhouse structures between codes of China and Europe[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 174-181. (in Chinese with English abstract)
- [6] 周长吉. 大型连栋温室设计风雪荷载分级标准初探[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 103-105.
Zhou Changji. Wind and snow load classification for greenhouse structure design[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(4): 103-105. (in Chinese with English abstract)
- [7] 齐飞, 周新群. Venlo 温室的荷载效应特征及其在工程中的应用[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 163-168.
Qi Fei, Zhou Xinqun. Features of load effects and application in designing Venlo greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 163-168. (in Chinese with English abstract)
- [8] 丁小明, 魏晓明, 李明, 等. 世界主要设施园艺国家发展现状[J]. 农业工程技术, 2016, 36(1): 22-32.
- [9] 李笑天. 基于 ANSYS 的日光温室桁架结构优化研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
Li Xiaotian. Research on Optimization of Solar Greenhouse Truss Structure Based on ANSYS[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [10] 谭静芳, 赵立新, 刘成勋, 等. 全玻璃钢温室设计荷载分析[J]. 农业装备技术, 2004(2): 42-43.
- [11] 武燕飞. 风压作用下温室结构荷载的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
Wu Yanfei. Research on Load of Greenhouse Structure Induced by Wind Force[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [12] 明月. 日光温室结构优化设计研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2007.
Ming Yue. Research on the Design of Optimization for Greenhouse Structure[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [13] 韩宏昌. 基于 ABAQUS 的银川地区 Venlo 型温室结构静动力分析及优化设计[D]. 宁夏: 宁夏大学, 2019.
Han Hongchang. Static and Dynamic Analysis and Optimization Design of Venlo Greenhouse Structure in Yinchuan Area Based on ABAQUS[D]. Ningxia: Ning Xia University, 2019.
- [14] Dova E, Sophianopoulos D, Katsoulas N, et al. Additional design requirements of steel commercial greenhouses in high seismic hazard EU countries[C]//Proceedings of the 7th National Conference on Steel Structures, Volos, Greece. 2011, 29.
- [15] 金健, 童乐为, 周锋. Venlo 型温室结构空间作用的分析与应用研究[C]//2014 年全国钢结构设计与施工学术会议. 北京: 中国钢结构协会, 2014: 132-135.
- [16] 丁敏, 朱丹, 许晶, 等. 风雪荷载作用下 Venlo 型温室结构整体性能研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(1): 120-128.
Ding Min, Zhu Dan, Xu Jing, et al. Space robustness of Venlo greenhouse structure under wind and snow load [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(1): 120-128. (in Chinese with English abstract)
- [17] 丁敏, 李密密, 施旭栋, 等. 考虑覆盖材料蒙皮效应的温室结构稳定承载力计算[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊 1): 224-232.
Ding Min, Li Mimi, Shi Xudong, et al. Stable bearing capacity calculation of greenhouse structures considering skin effect of covering material[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(Supp.1): 224-232. (in Chinese with English abstract)
- [18] 中国政府网. 地震已造成 50 多万亩农作物受灾劳动力损失严重 [EB/OL]. (2008-05-17)[2021-07-06] http://www.gov.cn/wszb/zhibo224/content_979964.htm.
- [19] 俞永华, 王剑平, 应义斌. 塑料温室拱结构雪载工况下极限承载力的非线性有限元分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 158-162.
Yu Yonghua, Wang Jianping, Ying Yibin. Nonlinear finite element analysis of the bearing capacity of arch structure in plastic greenhouse on snow load working condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(3): 158-162. (in Chinese with English abstract)
- [20] British Standard Institute(BSI), Greenhouses: Design and construction - Part 1: Commercial production greenhouse: BS EN 13031-1: 2019 [S]. Brussels: BSI, 2019.
- [21] Netherlands Normalisation Institute(NEN), Greenhouses: Design and construction-Part 1: Commercial production greenhouses : NEN 3859: 2012 [S]. Netherland: NEN, 2012.
- [22] 金健, 童乐为, 周锋. Venlo 型温室立柱的设计与优化[J]. 钢结构, 2014(增刊): 547-552.
Jin Jian, Tong Lewei, Zhou Feng. Design and optimization of Venlo-type greenhouse column[J]. Steel Structure, 2014(Suppl): 547-552. (in Chinese with English abstract)
- [23] GBT 51183-2016, 中华人民共和国住房和城乡建设部, 农业温室结构荷载规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [24] GB 50011-2010, 中华人民共和国住房和城乡建设部, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [25] GB 50009-2012, 中华人民共和国住房和城乡建设部, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

- [26] 施刚, 朱希. 不同规范中钢材强度设计指标对比分析[J]. 建筑结构, 2017, 47(13): 1-8.
Shi Gang, Zhu Xi. Comparison study of design strength in steel design codes of different countries[J]. Building Structure, 2017, 47(13): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [27] 李一哲, 魏晓俊, 王川申, 等. 中欧荷温室规范风、雪荷载的对比[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(24): 232-239.

Seismic performance analysis of Dutch Venlo greenhouse structure

Li Yizhe, Pian Chao*

(China Triumph International Engineering Co., Ltd., Shanghai, 200063, China)

Abstract: A Venlo-type greenhouse has widely been introduced from Netherland for modern agriculture in China at present. This type of greenhouse is also the largest, most commonly-used, and state-of-the-art glass structure with advanced equipment and control systems for super greenhouses in the world. However, few national standards are released for the structure design of modern agricultural greenhouse, although most industry or group standards in China. Furthermore, the combination of earthquake load other than wind load cannot be usually considered for the structure design in most studies, due to the light-weight components and covering materials in the greenhouse structure. If the greenhouse that designed by the Netherlands was directly introduced to adopt the Dutch structural standards in China, there is a safety hazard of seismic action for the damage of main structure, particularly for nearly half of land areas in high-level zones of seismic intensity in China, even above 7 degrees. Taking a Venlo-type greenhouse designed by a Dutch company in Shandong province as an example, this study aims to explore the impact of seismic action on structural safety according to the Dutch code, considering the stress diaphragm of covering material on the structural stiffness. A finite element software MIDAS Gen with the response spectrum modal was also selected to simulate the whole structure of the greenhouse with the seismic precautionary intensity of 7 (0.10 g), 7 (0.15 g), 8 (0.20 g), and 8 degrees (0.30 g). A systematic analysis was made on the mode periods, vibration patterns, the maximum stresses, and displacements for the structure. The results showed that the longest period of natural vibration was 1.75 s in the greenhouse structure, indicating a relatively flexible performance of the structural system. The first and second vibration patterns were the flat motion in Y and X -direction, especially a similar seismic performance in the 2 principal axes. Additionally, the maximum bearing capacity of the structure was 216.96 MPa for different seismic precautionary intensities under the wind load. The maximum stress was still less than the yield strength of components. When the seismic precautionary intensity exceeded 8 degrees (0.30 g), the maximum tensile and compressive stresses of components were 211.95 and 196.02 MPa for the X -directional seismic action, respectively. In addition, the maximum displacement was 31.80 mm under the X -directional wind load without considering seismic action. The structural deformation was also mainly influenced by the seismic load. Specifically, the Y -directional seismic action was about 11.6% than that in the X -direction under the same load combination. Consequently, the greenhouse structure introduced from Netherland can always be expected to fully meet the code requirements within the elastic range of components, when the seismic intensity was lower than 8 degrees (0.30 g). Nevertheless, the maximum deformation exceeded the standard requirement of 1/250 of the elastic inter-story displacement angle, according to the code for seismic design of buildings in China.

Keywords: greenhouse; structure; earthquake; seismic precautionary intensity; finite element; Venlo