

文章编号: 1000-4750(2011)12-0238-06

罕遇地震作用下沧州铁狮子结构现状研究

*王晓东^{1,2}, 王 伟¹, 王林安³, 范 峰¹, 永昕群³, 马清林³

(1. 哈尔滨工业大学土木工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨理工大学建筑工程学院, 哈尔滨 150080; 3. 中国文化遗产研究院, 北京 100029)

摘 要: 沧州铁狮子是我国首批国家级重点文物, 也是中国乃至世界上年代最早、体积最大的单体浇筑的室外大型铸铁文物。为研究铁狮子在地震作用下的安全性, 进行了弹塑性时程分析。采用三维激光扫描的方法建立了铁狮子的几何模型, 在封闭的空间实体上划分网格得到有限元模型, 对其在 8 度罕遇地震作用下响应进行了对比分析。计算结果表明铁狮子本身及支架的应力均远小于相应材料的强度, 水平及竖向变形均较小, 铁狮子结构的抗震性能满足要求。

关键词: 沧州铁狮子; 动力性能; 力学仿真; 三维建模; 结构安全

中图分类号: TU311.41 **文献标志码:** A

STUDY ON EXISTING SITUATION OF CANGZHOU IRON LION UNDER REAR EARTHQUAKE

*WANG Xiao-dong^{1,2}, WANG Wei¹, WANG Lin-an³, FAN Feng¹, YONG Xin-qun³, MA Qing-lin³

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Haerbin 150090, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Harbin University of Science and Technology, Haerbin 150080, China;

3. Chinese Academy of Culture Heritage, Beijing 100029, China)

Abstract: The Cangzhou iron lion is the first batch important heritage site under state protection, and it is also an earliest and biggest cast iron historical relic by one pouring technology. In order to evaluate the seismic safety of the lion, a non-linear time-history analysis was performed with finite element program. After the geographical model of the lion was acquired by the method of 3D laser scanning, a finite element model was founded through meshing on the closed entity and then the response of the lion under 8 degrees of an ordinary earthquake action. The results show that the stress of both the lion and its brackets is less than the yield stress respectively, horizontal and vertical displacements are both on the small side, and the lion structure has sufficient seismic safety.

Key words: Cangzhou iron lion; dynamic performance; mechanical simulation; 3D modeling; structural safety

铁的发现 and 大规模使用是人类发展史上一个光辉的里程碑, 它把人类从石器时代、铜器时代带到了铁器时代, 推动了人类文明的进步。我国从东周时就有炼铁术, 春秋战国时代得到广泛的普及, 是较早掌握冶铁技术的国家之一。在众多铁质工具、铁炮、铁塔以及铁佛等著名铁质文物中最为出

众的就是沧州铁狮子。它是目前世界上年代最久远、体积最大的单体浇注的室外铁质文物。它的存在充分说明了中国铸造技术比欧美等国家早近七、八百年这一史实。铁狮子铸造于后周广顺三年(公元 953 年), 位于河北省沧州市沧县旧州镇, 高一丈七尺, 长一丈六尺, 背负巨盆^[1]。狮头、躯干及四肢

收稿日期: 2010-04-02; 修改日期: 2010-11-24

基金项目: 中国文化遗产研究院基本科研业务费项目; 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAK20B00)

作者简介: *王晓东(1977—), 男, 吉林长春人, 讲师, 博士生, 从事钢结构及特种结构研究(E-mail: xdwang@hrbust.edu.cn);

王 伟(1957—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 博导, 主要从事能源结构、抗风、抗爆及可靠度研究(E-mail: wwang@hit.edu.cn);

王林安(1976—), 男, 山东人, 高工, 博士, 从事古建筑保护与研究工作(E-mail: wanglinanbj@126.com);

范 峰(1971—), 男, 安徽安庆人, 教授, 博士, 从事大跨空间结构设计及施工理论研究(E-mail: fanf@hit.edu.cn);

永昕群(1972—), 男, 北京人, 副研究员, 硕士, 从事古建筑保护与研究工作(E-mail: yongxinqun@126.com);

马清林(1958—), 男, 甘肃兰州人, 研究员, 博士, 从事文物保护研究(E-mail: maqinglin@126.com).

均为空腔体,最厚部位约为 35cm,最薄处约 3cm,民间传说重 40t,1984 年吊装移位时量测实际为 31.5 t^[2]。如图 1 所示。过去人们对它的研究^[3-6]大多归属人文、社科以及历史演变及保护记载等方面。北京科技大学^[7]在 2001 年对铁狮子进行过力学仿真,限于激光扫描设备以及后处理软件条件限制,模型中没有包含内外支架,因而分析结果体现的是原始状态的受力情况。本文在建模过程中考虑了支架对铁狮子的支撑作用,并且对其进行了非线性时程分析,使之能够更加真实的反映铁狮子的受力现状。



图 1 铁狮子现状照片

Fig.1 The photo of iron lion at present

1 铁狮子结构力学仿真

1.1 铁狮子有限元模型的建立

三维激光扫描建模技术广泛应用于汽车制造、影视制作、服装设计以及文物保护等领域。在文物数字模型方面 Pavlidis G^[8]等对三维激光扫描技术研究现状进行了总结; Fontana R^[9]等对智慧女神像进行了三维激光扫描; Fowles S^[10]等对木佛雕像进行了激光记录和虚拟修复。本文通过三维激光扫描的方法建立了铁狮子的几何模型,经过数据处理后得到了三维有限元模型。处理后的模型见图 2 和图 3 所示。

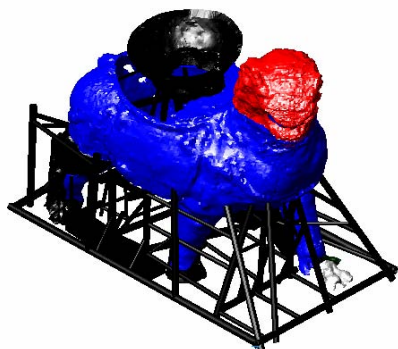


图 2 铁狮子几何模型

Fig.2 The geometric model of iron lion

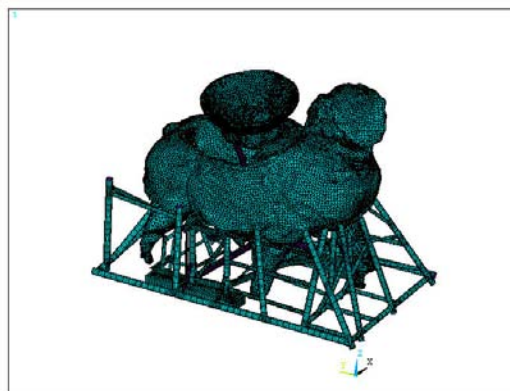


图 3 铁狮子有限元模型

Fig.3 Finite element of iron lion

其中狮子采用 solid185 单元模拟,支架采用 shell181 单元模拟,支架与狮子接触采用 target170 单元和 conta173 单元模拟。铁狮子材质主要为麻口铁、白口铁和灰口铁,含碳量>4.0%,属于铸铁,密度为 7200kg/m³,弹性模量为 60GPa,泊松比为 0.3,抗拉强度为 120N/mm²,抗压强度为 390N/mm²。支架为无缝钢管,弹性模量为 206GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 235N/mm²,采用双线性随动强化模型,斜率为 5‰。支架与铁狮子之间通过焊于钢管端部的钢板加橡胶垫传力,接触单元的法向接触刚度定义为 1.0,浸入度系数取 0.1。

1.2 铁狮子有限元模型的验证

铁狮子作为我国乃至世界上体积最大的室外铁质文物,具有重要的历史、艺术和科学等方面的研究价值。工程应用领域传统的加卸载的方法不能应用到铁狮子身上,但是可以通过动力特性试验得到的结构基频与有限元模型计算结果进行对比来验证模型准确性。现场测试时传感器位置见图 4 所示,其位置在铁狮子腹部偏上方。



图 4 加速度传感器位置

Fig.4 Position of acceleration transducer

铁狮子自重大而且整个结构刚度也很大,自然风荷载作用下传感器没有反映,改用敲击法来进行

量测，敲击位置见图 5 所示。人工激励下得到的数据见图 6 所示。分析采集数据可以得到铁狮子的前 3 阶频率。第 1 阶频率为 15.63Hz，第 2 阶频率为 21.48Hz，第 3 阶频率为 36.13Hz。

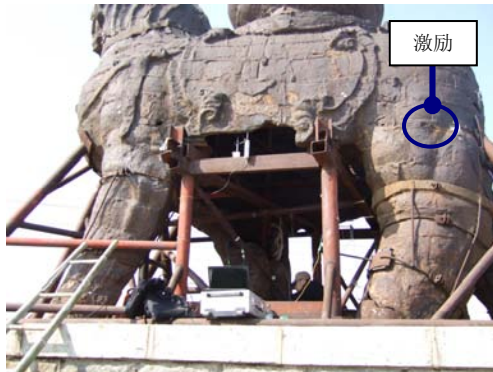


图 5 敲击位置示意
Fig.5 Position of penning

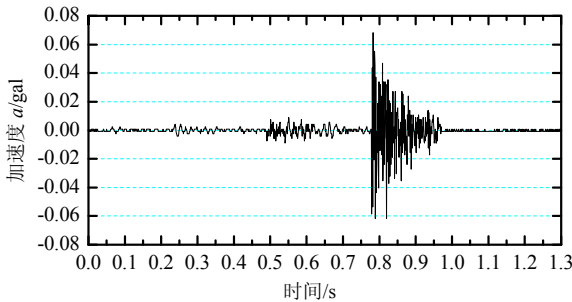


图 6 人工激励下的结构加速度时程
Fig.6 Accelerate time-history curve with exciting force

将有限元模型约束后计算得到相应的前 3 阶频率，将其与试验结果对比列于下表 1 所示。从表 1 中可以看出，第 1 阶相差 7.4%，第 2 阶相差 11.9%，而第 3 阶相差达到 20.8%。从结果来看 1 阶频率相差不多，2 阶以及 3 阶频率存在有一定误差。存在误差的原因主要有两个方面：一是铁狮子本身和支架所组成的结构刚度很大；二是人工激励很小。通过上述验证结果对比可以看出，本次所建立的模型准确，可以进行进一步的计算。

表 1 铁狮子自振频率的对比 /Hz
Table 1 Frequency data of iron lion

结果对比	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶
试验结果	15.63	21.48	36.13
有限元结果	16.79	18.92	28.60
误差率/(%)	7.4	11.9	20.8

2 非线性时程分析计算参数的选取

2.1 结构阻尼的确定

实际结构中的阻尼现象是由各种各样复杂的能量散逸所引起的，并不是简单的假设粘滞阻尼所

能代表的。确定阻尼矩阵的常用的方法是，取阻尼矩阵 $[C]$ 为刚度矩阵 $[K]$ 和质量矩阵 $[M]$ 的线性组合，即：

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \tag{1}$$

式中 α 、 β 为比例常数。

式(1)所表示的阻尼称为瑞利(Rayleigh)阻尼。可以看出，瑞利阻尼 $[C]$ 满足正交条件。

采用式(1)的阻尼矩阵可以利用正则化坐标对振动方程进行解耦，为了较好的反映实际结构的阻尼特性， α 和 β 最好通过实测资料来确定，也可通过下式确定：

$$\begin{cases} \xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta\omega_i \right) \\ \xi_j = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_j} + \beta\omega_j \right) \end{cases} \tag{2}$$

式中： ω_i 为第 i 振型的圆频率； ω_j 为第 j 振型的圆频率； ξ_i 为第 i 振型的阻尼比； ξ_j 为第 j 振型的阻尼比。

由式(2)可得：

$$\begin{cases} \alpha = \frac{2(\xi_i\omega_j - \xi_j\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \omega_i\omega_j \\ \beta = \frac{2(\xi_j\omega_j - \xi_i\omega_i)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \end{cases} \tag{3}$$

实际上，一般取 $i=1, j=2, \xi_i=\xi_j=0.05$ 。将铁狮子振动的前两阶圆频率 $\omega_1=16.776$ 1/s 和 $\omega_2=18.9081$ /s 代入式(3)得 $\alpha=0.8889, \beta=0.0028$ 。

2.2 地震波的选取及调整

目前世界各个国家都在对实际发生的地震进行记录，已经形成了许多条实测波供选择。但是由于场地条件不同、地震动强度不同，在进行地震波选择时往往需要对其幅值进行调整。一般常用的是加速度曲线，调整的目标是使加速度的峰值与规范中的要求相同，具体公式如下：

$$\alpha'(t) = \frac{A'_{\max}}{A_{\max}} \alpha(t) \tag{4}$$

式中： $\alpha'(t)$ 、 A'_{\max} 为调整后加速度曲线及峰值； $\alpha(t)$ 、 A_{\max} 为调整前加速度曲线及峰值。

抗震设计规范^[11]中 5.1.2 条规定：采用时程分析法时，应按建筑场地类别和设计地震分组选用不少于二组的实际强震记录和一组人工模拟的加速度时程曲线。由于分析时没有进行专门的地震安全性评估，因而选用 El Centro 波、Taft 波和宁河波 3

个实测的强震记录进行分析。铁狮子场地类别为III类,设计地震分组为第一组,其中 El Centro 波和 Taft 波适用于 II 类~III 类之间偏 III 类的场地,故可以选用;天津宁河波适用于 IV 类场地,考虑到位于同一地区,且主要作对比之用,故选用了此波。根据抗震设计规范附录 A 我国主要城镇抗震设防烈度、设计基本地震加速度和设计地震分组中关于设防烈度的划分,沧州地区属于 7 度区,考虑到铁狮子重要性,采用提高 1 度即 8 度(400cm/s²)标准进行计算。然后根据式(4)进行调整,使其满足 8 度抗震设防罕遇地震的要求,在 x 方向(南北)、y 方向(东西)和 z 方向(竖向)3 个方向的地震动输入比例按 1:0.85:0.65 取。经调整后的 El Centro 波加速度波形曲线见图 7、图 8 和图 9 所示。限于篇幅 Taft 波和宁河波略。

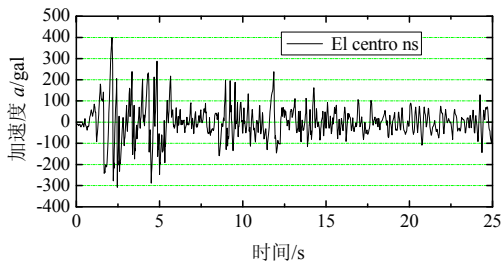


图 7 El centro 波南北方向(400cm/s²)
Fig.7 El centro NS curve (400cm/s²)

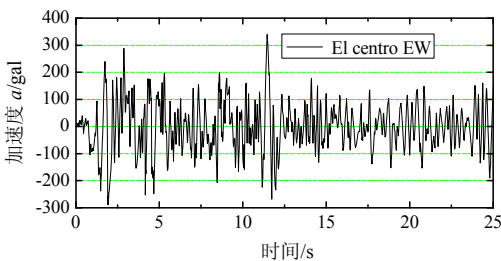


图 8 El centro 波东西方向(340cm/s²)
Fig.8 El centro EW curve (340cm/s²)

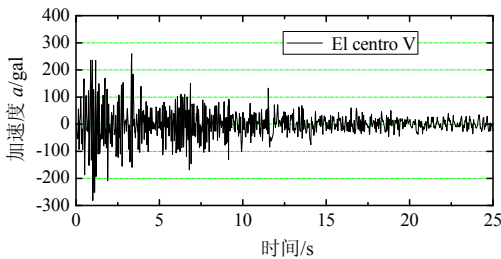


图 9 El Centro 波竖向(260cm/s²)
Fig.9 El Centro vertical curve (260cm/s²)

2.3 特征点的选取

在铁狮子及其外部支架上选取若干具有代表性的特征点,分析各特征点的应力和位移时程曲

线,找出最不利时刻,然后对最不利时刻的铁狮子在自重作用下和水平风荷载作用下初步计算,得出应力和位移较大的位置,同时为了使特征点具有代表性,在特征点的选取过程中忽略掉了刚度和受力都很小的内部支架,考虑外支架杆件支撑位置以及裂缝分布情况等因素,分别按照狮身和外部支架两个方面进行划分。具体情况为狮身 4 个特征点(应力和位移各 2 个),外部支架 4 个特征点(应力和位移各 2 个),共计 8 个特征点。其中特征点 1 和特征点 2 为狮身应力较大点,特征点 3 和特征点 4 为位移较大点,特征点 5 和特征点 6 为应力较大点,支架特征点 7 和特征点 8 为位移较大点。详见图 10 和图 11 所示。

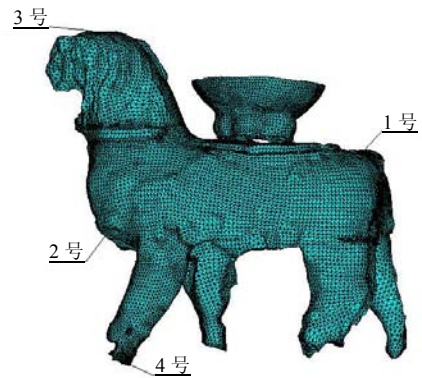


图 10 狮身特征点图
Fig.10 Characteristic points of lion

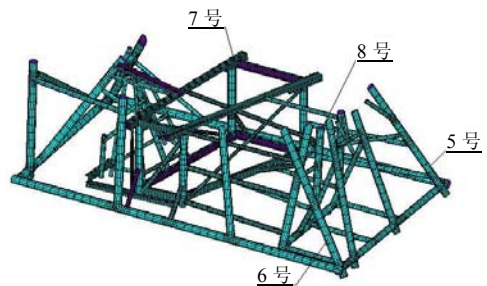


图 11 外部支架特征点图
Fig.11 Characteristic points of outer bracket

3 铁狮子地震反应计算结果及对比

截取地震波的前 20s 进行计算,其中铁狮子本身左-右两侧方向定义为 x 向,前-后定义为 y 向,高度方向定义为 z 向。鉴于铁狮子内部支架杆件截面尺寸多为 D63×3,远小于外部支架的 D133×7 且存在部分虚支撑情况,因此区分考虑内部支架和不考虑内部支架两种情况进行计算。

3.1 El Centro 波作用下特征点应力时程分析

狮身 1 号和 2 号特征点的第一主应力随时间的

变化曲线见图 12 所示。从曲线中可以看出包含内部支架时 1 号特征点应力最大值出现在 1.02s, 其值为 1.15MPa; 不含内部支架时 1 号特征点应力最大值出现在 1.02s, 其值为 1.18MPa。包含内部支架时 2 号特征点应力最大值出现在 0.98s, 其值为 0.40MPa; 不含内部支架时 2 号特征点应力最大值出现在 0.98s, 其值为 0.39MPa。

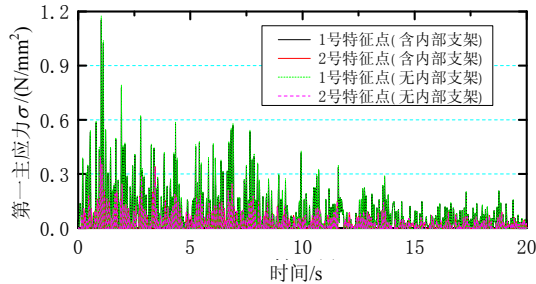


图 12 1 号和 2 号特征点第一主应力时程曲线图
Fig.12 First principal stress curve of point 1 and 2

支架 5 号、6 号特征点的米泽斯应力随时间的变化曲线见图 13 所示。从曲线中可以看出包含内部支架与否对应力最大值出现时刻没有影响, 均出现在 1.02s。5 号特征点包含内部支架时米泽斯应力最大值为 68.23MPa, 不含内部支架时米泽斯应力最大值为 67.24MPa; 6 号特征点包含内部支架时米泽斯应力最大值为 57.31MPa, 不含内部支架时米泽斯应力最大值为 56.47MPa。

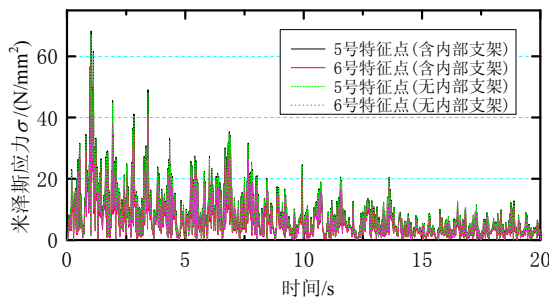


图 13 5 号、6 号特征点米泽斯应力时程曲线图
Fig.13 Mises stress changes curve of point 5 and 6

3.2 El Centro 波作用下特征点位移时程分析

狮身 3 号、4 号特征点的 x 向位移随时间的变化曲线见图 14 所示。从曲线中可以看出包含内部支架与否对应力极值出现时刻没有影响, 最大值均出现在 1.02s, 最小值均出现在 0.98s。3 号特征点 x 方向位移包含内部支架时最大值为 0.715mm, 最小值为 -0.594mm, 不含内部支架时最大值为 0.689mm, 最小值为 -0.572mm; 4 号特征点 x 方向位移包含内部支架时最大值为 0.839mm, 最小值为 -0.699mm, 不含内部支架时最大值为 0.836mm, 最

小值为 -0.696mm。

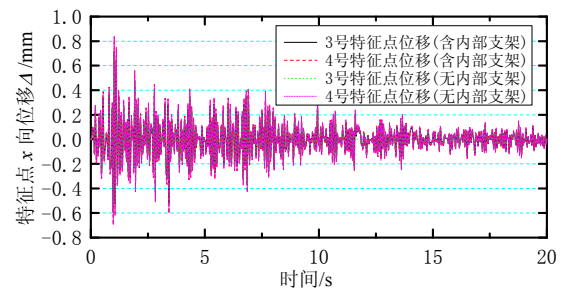


图 14 3 号、4 号特征点位移时程曲线图
Fig.14 Displacement curve of point 3 and 4

支架 7 号、8 号特征点的 x 向位移随时间的变化曲线见图 15 所示。从曲线中可以看出包含内部支架与否对应力极值出现时刻没有影响, 最大值均出现在 1.02s, 最小值均出现在 0.98s。7 号特征点 x 方向位移包含内部支架时最大值为 0.552mm, 最小值为 -0.458mm, 不含内部支架时最大值为 0.544mm, 最小值为 -0.451mm; 8 号特征点 x 方向位移包含内部支架时最大值为 0.429mm, 最小值为 -0.357mm, 不含内部支架时最大值为 0.427mm, 最小值为 -0.356mm。

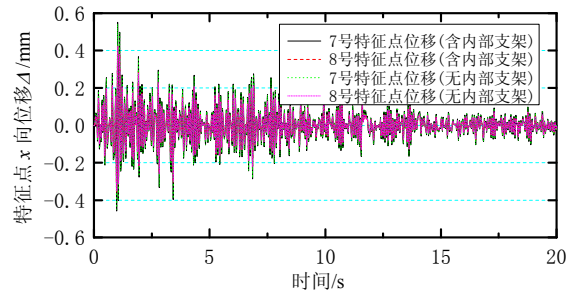


图 15 7 号、8 号特征点位移时程曲线图
Fig.15 Displacement curve of point 7 and 8

7 号和 8 号特征点分别位于铁狮子头顶和左前足下方, 图 15 中的曲线表明两个点振动同步发生, 极值点出现时刻相同, 没有相对运动, 说明铁狮子没有侧翻的趋势(模型中外支架与铁狮子之间采用接触单元模拟)。限于篇幅在 Taft 波和宁河波作用下的结果略。

3.3 结果对比分析

上述特征点的分析结果可以看出, El Centro 波作用下应力和位移最大时刻都集中在 $t=0.98s$ 和 $t=1.02s$ 两个时间点上; Taft 波作用下应力和位移最大时刻都集中在 $t=9.66s$ 和 $t=9.84s$ 两个时间点上; 宁河波作用下应力和位移最大时刻都集中在 $t=8.54s$ 和 $t=8.85s$ 两个时间点上。提取该时刻的应力和位移可以得到下表 2 所示最大值情况。对比

表 2 数据可以发现内部支架的存在对整个结构的应力和位移影响很小。文献[7]中机械性能试验的结果为铁狮子本身抗拉强度 120MPa, 抗压强度 390MPa。而此次计算结果表明第一主拉应力 10.8MPa、第三主压应力 92.7MPa, 两者都远小于材料的容许强度。作为支架的钢管米泽斯应力最大为 72.4MPa, 也远小于钢材的屈服强度 235MPa。同时整个结构的最大水平位移仅为 0.859mm, 不足 1mm, 满足安全的要求。

表 2 罕遇地震作用下弹塑性分析计算结果
Table 2 Elasto-plastic time history analysis results

计算结果	应力/MPa			位移/mm			
	σ_1	σ_3	σ_5	X向	Y向	Z向	
有	El centro	10.50	92.50	—	0.86	0.16	0.14
	taft	4.92	5.57	—	0.45	0.09	0.08
	宁河波	6.62	7.32	—	0.60	0.11	0.10
无	El centro	10.80	92.70	—	0.88	0.15	0.13
	taft	5.03	5.75	—	0.46	0.08	0.07
	宁河波	6.85	7.52	—	0.62	0.11	0.09
有	El centro	—	—	72.40	0.70	0.44	0.13
	taft	—	—	38.00	0.37	0.23	0.07
	宁河波	—	—	51.80	0.50	0.31	0.09
无	El centro	—	—	71.30	0.70	0.44	0.13
	taft	—	—	37.50	0.37	0.23	0.07
	宁河波	—	—	50.40	0.49	0.31	0.09

注: 表 2 中“有”表示考虑内部支架; “无”表示不考虑内部支架

4 结论及建议

通过沧州铁狮子结构的地震反应分析, 可以得到以下结论:

(1) 运用三维激光扫描的方式建立的铁狮子力学仿真模型的准确性得到了验证, 此方法可以推广应用于传统方式无法完成的复杂结构的建模。

(2) 在 8 度设防罕遇地震作用下铁狮子本身及现有支架的应力都远小于材料的容许应力, 最大位移不足 1mm。表明目前状态下的铁狮子结构在罕遇地震作用下处于安全状态。

(3) 特征点位移时程分析的结果可以看出铁狮子头顶和足底之间无相对位移, 因而没有发生翻转现象, 说明狮身与支架没有产生脱离。

(4) 非线性弹塑性分析结果说明整个结构处于安全状态, 但作为国家重点保护文物现有外部支架较不规则, 有碍观瞻。建议重新设计支架将其安放于铁狮子内部。

参考文献:

- [1] 张凤瑞, 徐国垣, 张坪, 等. 沧县志[M]. 天津: 文竹斋铅印本, 1931.
Zhang Fengrui, Xu Guoyuan, Zhang Ping, et al. Records of Cangxian [M]. Tianjin: Wenzhu Room Letterpress Printing Tianjin, 1931. (in Chinese)
- [2] 王世杰. 沧州铁狮子移位保护工程[J]. 古建园林技术, 1988(3): 40—44.
Wang Shijie. The shift protection project of Cangzhou iron lion [J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens, 1988(3): 40—44. (in Chinese)
- [3] 吴象. 沧州铁狮[J]. 瞭望, 1995(48): 53—53.
Wu Xiang. Cangzhou iron lion [J]. Outlook Weekly, 1995(48): 53—53. (in Chinese)
- [4] 刘毅. 沧州铁狮[J]. 金属世界, 1996(4): 22—22.
Liu Yi. Cangzhou iron lion [J]. Metal World, 1996(4): 22—22. (in Chinese)
- [5] 王福淳. 古代大铁狮[J]. 铸造设备研究, 2007(1): 53—58.
Wang Fuzhun. The big iron lion in ancient times [J]. Research Studies on Foundry Equipment, 2007(1): 53—58. (in Chinese)
- [6] 王玉芳. 沧州铁狮历次维修保护概述[J]. 文物春秋, 2008(3): 49—57.
Wang Yufang. Summaries of protection of Canzhou iron lion [J]. Stories of Relics, 2008(3): 49—57. (in Chinese)
- [7] 河北古代建筑保护研究所, 北京科技大学. 沧州铁狮子力学仿真研究报告[R]. 北京: 北京科技大学, 2001.
Institute of Ancient Buildings Preservation Hebei Province, University of Science and Technology Beijing. Mechanical simulation report of Cangzhou iron lion [R]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2001. (in Chinese)
- [8] Pavlidis G, Koutsoudis A, Arnaoutoglou F, Tsioukas V, Chamzas C. Method for 3D digitization of Cultural Heritage [J]. Journal of Cultural Heritage, 2007(8): 93—98.
- [9] Fontana R, Greco M, Materazzi M, Pampaloni E, Pezzati L, Rocchini C, Scopigno R. Three-dimensional modeling of statues: the Minerva of Arezzo [J]. Journal of Cultural Heritage, 2002(3): 325—331.
- [10] Fowles S, Larson J H, Dean C, Solajic M. The laser recording and virtual restoration [J]. Journal of Cultural Heritage, 2003(4): 367—371.
- [11] 中华人民共和国建设部. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2001. (in Chinese)