

洛阳隋唐城天堂遗址保护建筑设计

王昌兴, 徐珂, 田立强

北京清城华筑建筑设计研究院, 北京 100083

[摘要] 洛阳市隋唐城天堂遗址保护展示建筑为古文物保护建筑, 结构设计在首层采用 54 米跨度桁架转换结构, 托起上部 57 米高仿古塔建筑。采用大跨度转换结构方案, 实现在遗址有效范围内不落基础的古建保护设计思想, 有效保护原址上的遗存物。分析转换结构的选型, 整体结构的特性, 重要节点有限元分析及重要构件验算标准。

[关键词] 大遗址; 古建保护建筑; 54 米桁架转换结构; 特征值分析; Pushdown;

Structure design of Tiantang for the protection of the ruins of ancient buildings which built in SuiTang Dynasty in Luoyang City

Wang Changxing, Xu Ke, Tian Liqiang

Beijing THCA Architectural Design & Consulting Institute, Beijing 100083, China

Abstract: Tiantang is the protection of the ruins of ancient buildings which built in SuiTang Dynasty in Luoyang City, 54 meters span truss conversion structure is taken on the first floor adopts in structure design which can hold 57 meters high upper archaize tower buildings. Big span conversion structure is used to meet the thought of protecting ancient building effectively. The type of the conversion structure, the characteristics of the whole structure, the important node finite element analysis and the important component checking standard is studied in the paper.

Keywords: the big site; ancient for the protection of building; 54 meters span truss conversion structure; eigenvalue analysis; Pushdown

1 工程概况

天堂遗址位于洛阳市隋唐城宫城核心区中轴线西侧, 是唐代武则天时期一座重要建筑的遗址, 具有重要的历史、文化、艺术和旅游价值, 1977 年进行局部考古发掘后一直处于暴露在自然环境中的状态。为了更好地保护遗址, 整体展示和宣传隋唐洛阳宫城的文化价值, 在遗址上修建一座外观仿唐代风格的遗址博物馆。

“天堂”和前期建设的“明堂”在武则天时期属于特有宫城建筑, 天堂内设佛像, 具体描述在史书上只有零星记载, 根据《旧唐书》记载, “时则天又于明堂后造天堂, 以安佛像, 高百余尺。始起建构, 为大风振倒。俄又重营, 其功未毕。”可知天堂在建设时就发生倒塌事件, 经过前后两次建设, 最终仍未能完工。公元 695 年正圣元年正月天堂失火, 延烧至明堂, 两堂同毁于火灾, 其后未再复建, 天堂实际存在 7 年。由于“天堂”在中国历史上具有重要象征意义, 目前仅有文字记载没

有图像文献, 因此对武则天时期天堂建筑形态的争论较多, 目前的复原研究无法确定其建筑方案。本次保护建筑放弃复原思路, 在兼顾遗址保护和隋唐博物馆功能下, 外观尽可能反映出唐朝建筑的时代风格和天堂的主要面貌。

天堂遗址保护项目由清华大学郭黛姮先生主持, 她对结构设计提出以下几点要求:

1. 天堂遗址是隋唐城宫城核心区内保存最完整和最具观赏性的遗址, 主要遗存物为隋唐时期的古夯土层和中心圆坑, 结构设计时要尽量不破坏古夯土层和圆坑, 保护天堂的各类不可移动遗存, 并利用保护建筑的内部空间承担展示功能。

2. 在技术可行的情况下采用跨越结构, 使中心区的遗址不被现代保护建筑所混杂和破坏。

3. 建筑底层要给参观游人留出足够的面积和空间可以近距离浏览遗址情况, 减少结构构件对遗址的覆

盖和遮挡。

4. 要通过灵活的现代结构处理,解决遗址与原址建设的矛盾,传达遗址信息的真实性和建筑地点的真实性。

2 遗址现状

天堂遗址平面呈圆形,中心有圆坑,坑壁为青石砌筑,坑底有八边形夯土层,中有三块并列排放的石板。圆坑向外分布有两圈柱础遗址,内圈为12组,外圈为20组,东南向、西北向的内外柱础有径向对位关系,柱础遗存为最底层构造,下面为四方形夯土层,其上码放四块方形石块。再外侧为圆形包边石沟,以不规则石块糙砌,实际破坏严重^[1,2]。天堂遗址航拍图见图1,图中圆型构筑物即为天堂遗址的中心圆坑,遗址测量图见图2。



图1 天堂遗址航拍图

3 建筑设计思路

郭黛姮先生曾主持杭州雷锋塔保护建筑设计,该项目采用钢结构跨空在遗址上,做到保护建筑与遗址没有直接接触,图2是雷锋塔保护建筑的剖面图,因此她建议结构工程师参考这个方案进行设计,采用倒扣金钟的形式,通过入口层斜柱将上部重量传递下来,上部结构放置在下部台基上,台基根据场地情况下落基础或采用跨空结构进行支撑,图3是建筑师的初步构想。

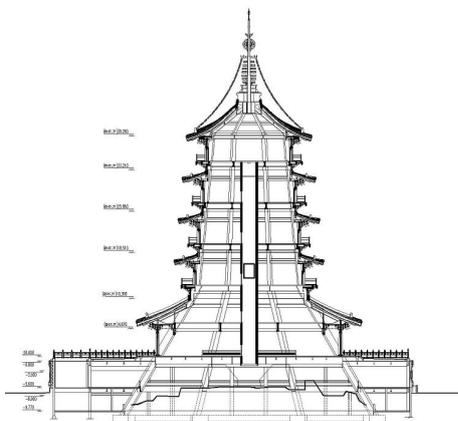


图2 杭州雷锋塔保护建筑剖面示意图

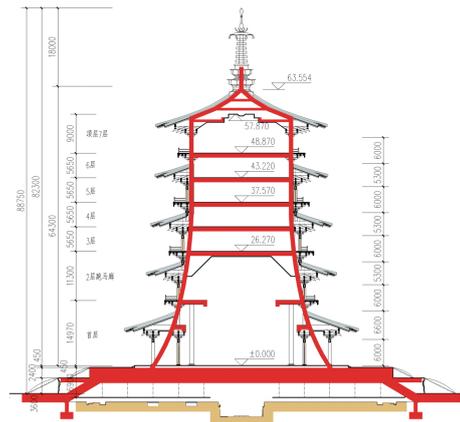


图3 洛阳天堂保护建筑前期方案

结构工程师仔细分析两个项目的特点后认为采用该方案是有困难的:

1. 雷锋塔台基上的两层外围裙楼高宽比较大,有利于斜柱布置下来,并且斜柱直接落地。而天堂通过斜柱下来,如果直接落地将落在第二圈柱础边缘,必然要破坏遗存物。

2. 如果不直接落地,需要台基平台做转换结构来实现,除非斜柱的倾斜角度更大,才能延伸到台基边缘,但这种方案的结果是,因台基高度不够斜柱到边缘最终成为一个接近水平的构件。

3. 洛阳天堂的内圈柱为12根,外圈柱为20根,根据建筑设计方案,主体立柱为12根,采用斜柱后,与台基上一层裙楼的外围柱数20根不对应,斜柱在空间上出现在参观视野里,在建筑形态上会出现混乱感。

上述三个问题造成建筑师和结构工程师均不能获得满意效果,经过多次方案讨论,在各方确定中心两道柱础圈内、直径45米范围内不能落基础的情况下,既然斜柱落在台基上仍需要转换结构才能落地,不如放弃斜柱方案,采用以天堂柱础数量竖直设计上部结构,内柱12根外柱20根,这样建造出来的上部建筑最符合天堂的真实情况,不会在结构形态上扰乱视觉,充分利用台基高度作转换结构设计。

基础落地点有两种选择,一是在包边石沟外落地,直径约70米(前期方案是在此条件下讨论的),此区域遗存物较为复杂,除唐代夯土外,还有隋、宋遗址。二是在第二圈柱础与包边石沟之间落地,直径约55米,此区域遗存物较为单一为夯土,厚度较薄且在近代城市建设中破坏严重。在综合各方面因素后,由国家文物局最终确定落地基础直径为54米。

4 整体结构设计方案

在确定基础落地位置后,结构整体方案考虑由三部分组成,最下部基础部分由桩基础+直径54米钢筋混凝土封闭环向梁组成,台基部分采用12榀径向布置钢桁

架圆形转换结构,托起建筑高度 57 米上部钢框架结构。图 4 是结构剖面示意图。从图中可以看出结构高宽比接近 1:1,整体抗倾覆能力较强。上部结构外围钢柱轴线直径 40 米,内围钢柱轴线直径 22 米,在转换层上,按内围钢柱计算,高宽比为 2.6:1。转换桁架在下部中心处根据建筑师要求设直径 11 米圆孔,用于游客无遮挡观赏中心圆坑。

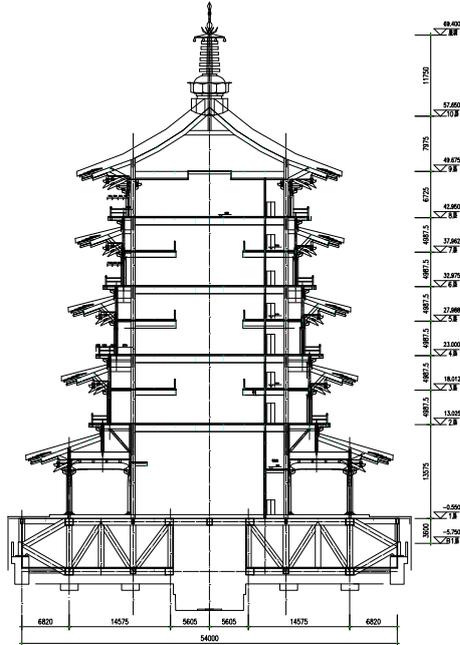


图 4 洛阳天堂结构剖面图

转换层上的 1 层至 9 层为主体结构,其中内圈柱网直径约 22 米,为从上至下通长布置,外圈柱根据古建筑特点,上部外围柱是逐层向下外移形成建筑效果,结构上需要通过转换结构实现,首层转换还需解决 12 根柱变化成 20 根柱问题。楼层钢梁呈放射状布置,支撑直径约 22 米楼盖,主体部分结构高度约 57 米。

桁架转换构件尺寸:上弦: $1000 \times 800 \times 60 \times 60$; 下弦: $1000 \times 800 \times 60 \times 60$; 中心环形杆: $1000 \times 1200 \times 60 \times 60$; 桁架腹杆: $800 \times 800 \times 40 \times 40$ 。钢材采用 Q420 级钢。

5 设计条件

根据相关规范和任务要求,结构耐久性设计年限为 50 年,结构重要性系数为 1.1;抗震设防类别为重点设防类(乙类)。

抗震物抗震设防烈度为 7 度,设计基本地震加速度为 0.10g,设计地震分组为第一组,场地类别为 II 类,场地特征周期在多遇地震和设防地震时 $T_g=0.35s$,整体结构阻尼比取 0.02,地震影响系数计算多遇地震作用时取 $\alpha_{max}=0.08$,设防地震性能分析取 0.23,罕遇地震性能分析取 0.50。

非地震设计的荷载组合根据规范要求设置恒+活荷

载组合和恒+全楼半跨活荷载组合两大类。温度作用作为分项系数取 1.2,组合系数取 0.6,当与其他可变荷载组合时取 0.3。

地震设计的荷载组合除按抗震规范式要求计算外,还考虑双向和三向地震作用组合,考虑水平双向地震组合时,组合值比例采用 1:0.85;考虑三向(两水平向和竖向)地震作用时,组合值比例采用 1:0.85:0.65。

6 转换桁架方案选择

桁架支撑转换结构是最重要的部位,它的结构方案合理性直接影响整个建筑的安全性,设计之初提出两种方案进行对比:

1、整个转换结构平面形状为圆形,沿径向布置 12 榀放射状径向桁架,竖向支撑 12 根内圈柱,20 根外圈柱需布置桁架间次梁支撑。转换桁架总高度为 6.0 米。桁架支撑点标高同桁架下弦底标高。桁架支撑在直径为 54 米的环向混凝土承台梁上,混凝土承台梁截面尺寸预估为 4.5×3.0 米,桁架剖面见图 5。

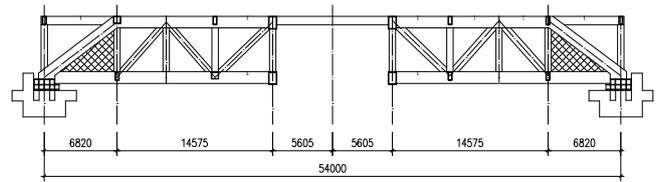


图 5 桁架支撑转换结构方案一

2、桁架支撑转换结构的平面形状和布置方式同前方方案。桁架总高度为 8.2 米,桁架支撑点位于桁架总高度的中分线上。桁架支撑在直径为 54 米环向混凝土承台梁上,混凝土承台梁截面尺寸为 2.0×4.0 米,桁架剖面见图 6。

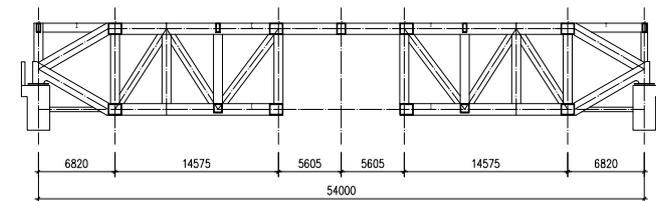


图 6 桁架支撑转换结构方案二

两个方案的共同点是均采用钢桁架结构传递上部荷载,下部基础环梁将荷载传递给桩基础,主要的区别是方案一实际受力呈现拱结构特点,上弦杆件为主要受压杆件,下弦受拉但拉力与上弦压力相比较小,桁架效应不明显;方案二为桁架结构受力特点,上弦杆受压,下弦杆受拉,两者轴力绝对值接近。

经分析方案一拱效应明显,在结构高度上低于后者,12 榀桁架对基础环梁产生的水平推力较大,在前期讨论斜柱方案时,也存在水平推力问题,基础环梁除传递竖向荷载外,必须有足够的、长期的轴向抗拉刚度

确保上部结构安全。水平推力过大对基础环梁抗平衡能力要求很高，在地震或风荷载产生不对称作用时内力分布变化剧烈，对连接节点反复受力性能和环梁配筋方案要求很高，环梁受力主要以水平力为主，环梁扭转效应明显。方案二为典型桁架，桁架支撑点位于桁架中和轴处，在理论上是不会产生水平推力，实际模型中因楼板刚度影响有一定差异，产生的水平力很小，对上部荷载变化也不敏感，基础环梁的受力主要以竖向力为主，扭转效应不明显，连接节点按铰接设计即可。综合以上分析，下部转换结构选择方案二。

7 结构分析

结构计算主要采用 MIDAS/GEN 软件分析，采用 SAP2000 进行校对分析，以基础环梁顶面作为上部结构的嵌固位置，周期折减系数取 0.9，基础环梁与桩基础连接点采用弹簧约束模拟桩基础的水平刚度和竖向刚度，根据地质勘察报告提供相关数据，推算单桩桩顶水平弹簧刚度取 7480kN/m，竖向刚度取 100000kN/m。

1、结构特征值分析情况

由于建筑在平面上为圆形布置，且平面布置较为均匀，各个方向刚度接近，整体前两阶振型为 X 向和 Y 向平动，周期均为 1.97S，见图 7；扭转第一阶振型周期为 1.53S，扭转平动周期比为 0.77，见图 8。顶部鞭梢振型周期为 0.56S。

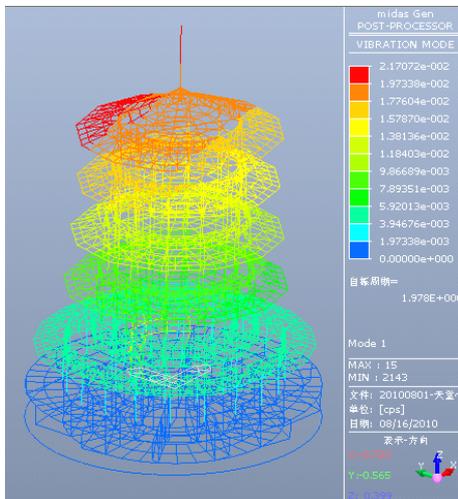


图 7 结构整体平动第一模态 T1=1.9780S

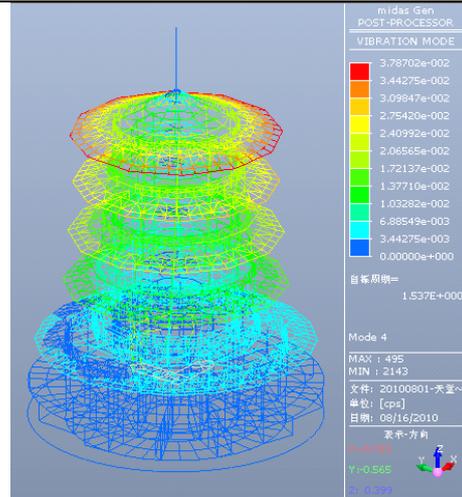


图 8 结构整体扭转第一模态 T4=1.5365S

表 1 是两种软件分析特征值结果对比情况，两者计算值有区别，主要是楼板刚度因软件模拟差异产生的，但各数据间表现趋势是一致的，主要振型动态表现相符，计算结果是可接受的。

MIDAS 与 SAP2000 特征值结果对比 表 1

振型	MIDAS 结果	SAP2000 结果	差值
X 向平动 (T1)	1.9780	2.1022	6.28%
Y 向平动 (T2)	1.9736	2.1052	6.67%
Z 向扭转 (T3)	1.5365	1.6378	6.59%
周期比(T3//T1)	0.777	0.779	0.25%

因下部转换结构与上部钢框架结构刚度差异较大，为考察上部结构特性，特别是上部结构是否以平动为第一振动模态，对上部结构进行单独分析，模型中框架柱脚设为固定铰支座，即约束 X/Y/Z 三个平动自由度，释放三个转动自由度，上部条件不变。前两阶振型为 X 向和 Y 向平动，周期分别为 2.52S 和 2.48S，扭转第一阶振型周期为 1.83S，扭转平动周期比为 0.73，与整体分析结果的趋势一致。

2、扭转振型分析

通过观察振型变化，第一扭转振型发生在顶层外挑飞檐处，其它各扭转振型也与各层外挑飞檐相关，这与圆形建筑特点有关，当框架柱外部悬挑部分质量较大时，结构扭转效应明显，为控制扭转振型，设计主要采用以下几种方法，一在每层结构上部利用建筑造型高度，沿两圈框架柱环向设桁架结构，增加结构整体抗扭转刚度；二飞檐结构中设水平桁架结构，增加飞檐部分抗扭转刚度；三与建筑师协商飞檐建筑做法，控制飞檐荷载。

3、转换结构在竖向荷载下的位移

下部大跨度桁架支撑转换结构在竖向荷载（1.0 恒+1.0 活）作用下的竖向位移为 59.66-16.56（平台周边

竖向位移) =43.14mm, 挠度为 $43.14/54000=1/1251$ 。整个平台竖向位移变化较为均匀见图 9, 与上部结构、荷载分布情况相符, 无明显突变情况, 符合结构设计意图。

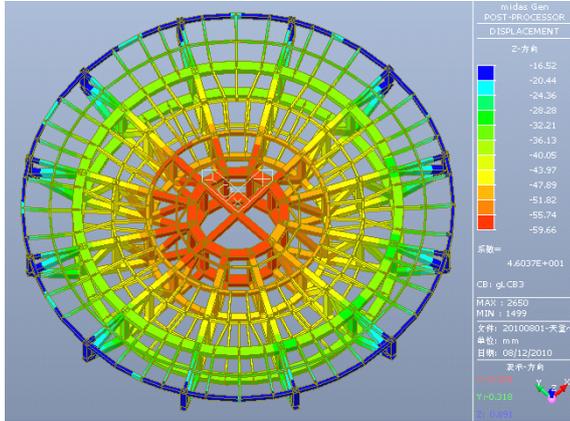


图 9 转换结构的竖向位移情况

4、水平荷载作用下结构位移

按 7 度地震作用计算, 结构整体最大水平位移为 60.60mm (位移/高度=1/1222); 层间位移角最大值发生在建筑中部结构第 5 层为 1/783, 按 8 度地震作用计算为 1/391, 满足钢结构设计要求。按百年重现期计算风荷载, 结构整体最大水平位移为 53.01mm (位移/高度=1/1397); 层间位移角最大值发生在建筑中部结构第 3 层为 1/952。

8 静力弹塑性分析

Pushover 分析采用振型形状分布计算模式, 在定义工况时重力荷载采用“1.0 恒荷载+0.5 活荷载”作为初始重力荷载, 根据特征值分析结果和本工程特点, 以顶部坡屋面顶点作为侧移控制点。经分析, 在罕遇地震作用下, 桁架转换结构和上部框架柱未出现塑性铰, 框架梁出现少量塑性铰; 在超过设防地震作用后, 上部结构中的环向桁架腹杆最先出现塑性铰, 随着顶点位移的增加, 塑性铰数量逐渐增加和发展, 达到罕遇地震作用下的性能点时, 上部结构的少量桁架弦杆也开始出现塑性铰。从推覆能力曲线上分析, 结构侧向刚度出现弱化时, 结构等效阻尼比为 6.5%, 层间最大位移角为 1/92。结构方案符合规范要求的“小震弹性、中震可修、大震不倒”的抗震设防性能目标。

Pushdown 分析采用竖向加载方式, 通过不断增加竖向荷载得到结构竖向荷载-位移曲线(图 10), 该曲线为非线性曲线, 可以了解结构在竖向荷载作用下结构的屈服荷载, 通过塑性铰的形成顺序可以发现结构的薄弱部位。

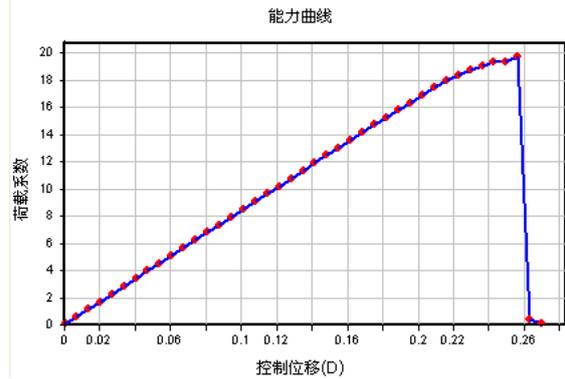


图 10 Pushdown 竖向荷载-位移曲线

根据塑性铰出现情况分析, 当竖向荷载小于“1.0 恒荷载+12.4 活荷载”时, 中心控制点竖向位移为 147.63mm, 挠度为 $147.63/54000=1/365$, 下部桁架转换结构构件完全处于弹性状态, 没有构件出现屈服。竖向极限承载能力为“1.0 恒荷载+19.7 活荷载”, 控制点竖向位移为 256.50mm, 挠度为 $256.50/54000=1/210$ 。根据竖向变形和塑性铰出现位置和发展状态, 转换结构的设计方案是安全的。

9 重要节点有限元分析

因桁架与环梁连接节点尺寸较大, 为考察节点钢材安全性, 采用通用有限元计算软件 ABQUS 进行有限元分析。节点包含的部件主要是柱脚底板、靴板、加劲板、柱脚锚栓(包含螺帽), 除锚栓、底板和下部混凝土以外, 其他部件几何均为一体, 底板下表面与混凝土梁上表面的连接采用接触对算法模拟, 锚栓与周围混凝土孔侧面的粘结状态采用 tie 算法模拟, 底板下表面接触对的摩擦系数设置为 0.35。图 11、12 为节点分析应力云图及接触云图。

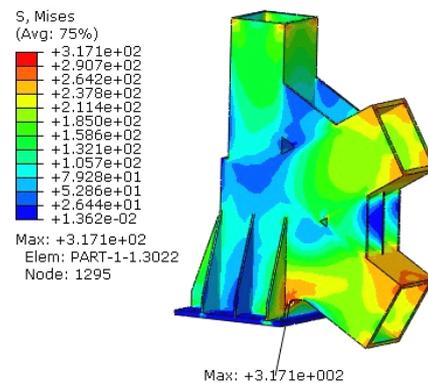


图 11 节点 Mises 应力云图

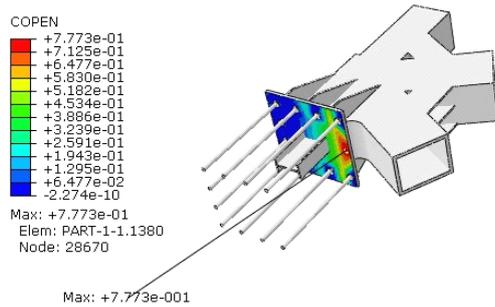


图 12 节点底板与混凝土环梁接触状态云图

转换结构主要构件采用 Q420 钢材，其最小屈服强度为 360N/mm^2 ，《钢结构设计规范》对于板厚在 $50\sim 100\text{mm}$ 范围内的强度设计值规定为 325N/mm^2 ，分析得到的柱脚节点细部最大 Mises 应力为 317.1N/mm^2 ，未超过材料的强度设计值 325N/mm^2 ，出现在下弦斜梁与柱脚底板的圆弧过度接触边缘。接触非线性分析显示柱脚底板在控制工况作用下与混凝土表面的最大间隙为 0.777mm ，出现在底板内侧，与节点存在水平向外推力情况相符。

10 主要构件验算标准

结合工程的重要性、国家规范要求和抗震设计性能目标，对重要构件确定不同的地震力放大标准^[3]。

对大跨度转换桁架，设防烈度为 7 度时地震力放大系数取 1.15×1.50 ，设防烈度为 8 度时地震力放大系数取 1.15×1.30 ，7 度中震弹性验算时地震力放大系数取 1.15×1.30 。对上部结构中转换梁、框架柱，设防烈度为 7 度时地震力放大系数取 1.50，设防烈度为 8 度时地震力放大系数取 1.30。

11 结语

天堂遗址保护建筑主体结构采用 54 米跨度桁架支撑转换结构与上部钢框架相结合组成的圆形框架结构，属平面规则、而竖向不规则结构，在多遇地震作用下，结构的刚度、强度、稳定均满足规范要求。经静力弹塑性分析，结构的能力曲线和罕遇地震的需求曲线能够求得性能控制点，大跨度转换桁架满足大震不屈服的性能要求。

参考文献

- [1] 洛阳隋唐城宫殿发掘情况介绍[M]. 洛阳:洛阳博物馆, 1980
- [2] 洛阳隋唐城宫城遗址发掘情况补充资料[M]. 洛阳:洛阳博物馆, 2009
- [3] GB 50011-2001 建筑抗震设计规范 (2008 年版) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

