

洛阳隋唐城明堂遗址保护建筑施工 可逆性设计实践

Construction Reversible Design Practice of Mingtang for the Protection of the Ruins of Ancient Buildings Built in SuiTang Dynasty in Luoyang City

撰文 王昌兴^{1,2} 徐珂^{1,2} 田立强^{1,2} 肖金亮¹

1 北京清华城市规划设计研究院 2 北京清华华筑建筑设计研究院

摘要 洛阳市隋唐城明堂遗址建筑为文物保护单位建筑，整体设计以不破坏古文物、施工可逆（拆除再安装）为指导，除个别部位外构件均采用工厂预制，构件现场拼接，可逆施工，与保护遗址可区识别。项目在实施工程中，建筑师和结构工程师通力配合，采用全新的解决方案实现了设计目标。

关键词 大遗址 古建保护性建筑 预制结构 不埋置基础 可逆施工



图1 中心柱坑图片

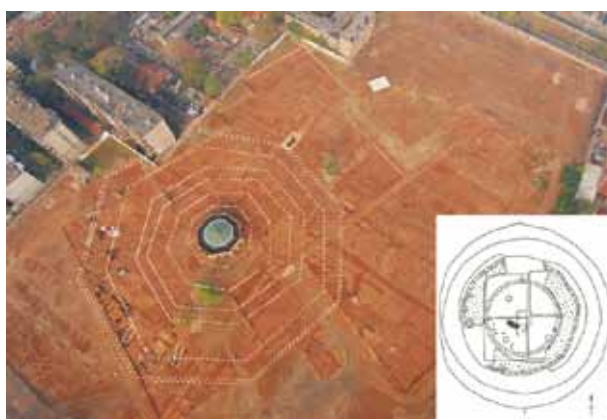


图2 明堂遗址航拍图

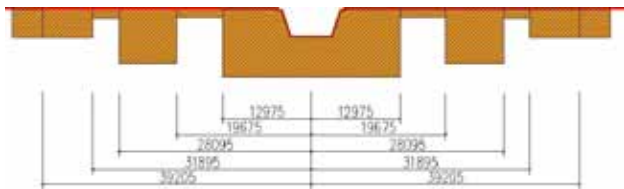


图3 明堂遗址夯土层剖面示意图

0 引言

武则天时期的明堂是在主要宫殿乾元殿址（即隋之乾阳殿）建造的殿堂，建成于公元688年，落成后成为武周时期神都洛阳皇宫的正殿，其和随后修建的天堂不仅是唐代宫殿建设史上的里程碑，而且对后世影响深远。北京天坛的祈年殿建造就参考了唐洛阳明堂的上圆以法天，下（台基）方以法地等基本要点。

公元695年天堂发生火灾，延烧至明堂，两堂同毁于大火。由于两堂只有文字记载，没有任何图像文献，其建筑形象历来众说纷纭、莫衷一是。依据日本收藏唐尺平均值每尺约为30.03cm计算，明堂高约88m，平面尺寸约90m×90m见方。由于明堂和天堂损毁时间久远，经千年社会变迁，遗址处地上部分早已荡然无存，在地面覆土下仅留古夯土层和中心柱坑，中心柱坑于1986年进行了局部挖掘，柱坑为一上口直径9.8m圆坑，底径6.16m，距夯土面4.06m，坑底为四块大青石构成的巨型柱础。

作为隋唐洛阳城大遗址的重要组成部分，明堂遗址具有重大的历

史、文化、旅游价值，在进行保护性建筑设计和建设时，如何有效保护既有地下文物，为将来的再保护工作保留更多的可操作余地，成为设计师面临的重大课题。

1 遗址情况

明堂遗址于1986年进行局部发掘工作，根据洛阳唐城考古队介绍，明堂基址平面呈八角形，基址主要包括中心柱坑（图1）和外围六圈红褐色夯土殿基，六圈夯土厚度不同，中圈厚外圈薄，夯土上无明显柱础痕迹^{[1], [2]}，其航拍图见图2，明堂北侧是隋乾阳殿和宋太极门遗址，遗址中心八角形建筑为文物部门于1988年在柱坑上修建的临时性保护房屋。图3是夯土分布情况及剖面情况，夯土厚度与上部房屋承重有一定关系，明堂夯土厚度变化，符合古建筑在立面上内高外低体形变化的荷载要求。

2 保护问题的提出

明堂遗址保护建筑的规划和设计由清华大学郭黛姮先生主持，她对于具体设计提出以下原则：



图4 西安大明宫遗址保护

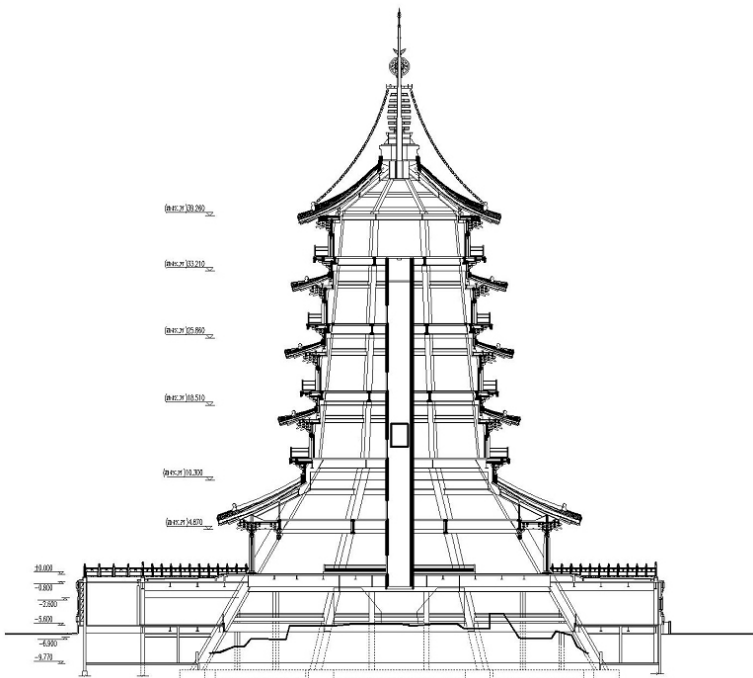


图5 杭州雷锋塔遗址保护

(1) 谨守不破坏遗址的原则，保护遗址的真实性和完整性。

(2) 设计要充分考虑遗址情况，施工要采用科学的方法，避免施工因素破坏遗址，不能为了建设保护建筑而采用现代机械破坏文物。

(3) 保护建筑应当具有可识别性。避免保护建筑与遗址混为一体，让后代无法区分，给后人留下更大的保护难题。

(4) 保护建筑应当具有施工可逆性。应考虑遗址保护是长远事件而保护建筑有使用寿命，设计阶段就要考虑建筑合理拆除的问题，拆除工作也要做到不对遗址产生破坏，为后代进行调整和完善遗址保护工作留有充分的余地。

(5) 保护建筑在建成后，要给建筑使用期的考古工作留有余地，不能因为保护建筑在遗址上做了个盖子，使考古人员揭不开盖子无法下去工作。

(6) 中心区柱坑是最重要的展示文物，其周边夯土层已经有所松动，需要考虑保护建筑在施工和使用过程中的影响。在技术允许的情况下，落地支撑结构要远离遗址中心区。

如果能做到上述原则，也就实现了在文物保护工作中的绿色节能、重复利用指导思想。

从上述要求可以看出，明堂保护建筑如果采用常规设计方法特别是常规结构设计将对遗址有重大影响，需要建筑师和结构师通力合作，采用创新性思维来解决这一课题。

3 可借鉴的遗址保护方法和建筑师的方案

对于考古遗址的保护方法，国内外有过很多探索和尝试，可以借

鉴的方式有：

(1) 遗址封土掩埋保护方式，在保护土层之上再进行复制建筑基址的外轮廓、柱位等意向性展示，如西安大明宫遗址保护。这种方式对地下遗址是最好的保护方式，可以有效隔绝外界影响，恢复遗址在发掘前的状态。但采用掩埋方法对游客参观影响较大，历史可视性较少。

(2) 在原址上覆盖保护性建筑，做到现代技术与遗址不直接接触，保护建筑的外观，按照严格的历史考证形象建造，使其与周边环境融合，恢复历史上的整体形态，如杭州雷锋塔遗址保护，采用斜向支撑钢结构跨越技术，让出中心区遗址（图5）。由于结构需要采用斜柱布置，内部视觉上与古建形象相去较远。

(3) 结合上述两种方式，对次要建筑的遗址进行封土保护，在封土上进行模拟展示，对重要建筑进行再现，如日本奈良平成京遗址保护（图6a）。

(4) 不考虑历史建筑形态，取代以现代建筑形象，采用钢结构技术，在遗址上做一个大跨度保护罩，基础落于遗址周边，与遗址完全脱开，如成都金沙遗址保护（图6b）。

回到明堂保护建筑面临的问题。由于只有文字记载而无图像文献，历史上对于明堂建筑形象争议很多，目前的复原研究不能得出令人信服的方案，因此在原址上进行仿古复建是不可行的。鉴于遗址中心柱坑具有明确的可读性，且明堂遗存与周边遗址混杂，建筑师对保护建筑提出两种方案：一是全部采用中部跨空保护方案（图7）；二是周边封土掩埋，中部跨空保护方案（图8）。两个方案基本遵循“中部



(a) 日本奈良平成京遗址保护



(b) 成都金沙遗址保护
图6

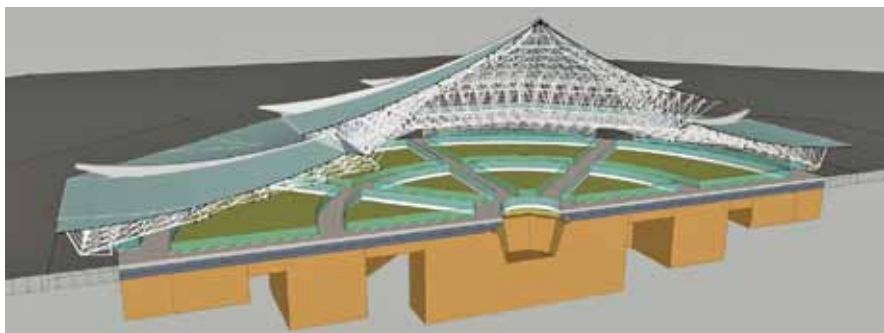


图7 洛阳明堂跨空保护方案

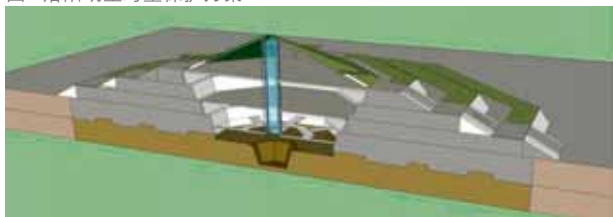


图8 洛阳明堂周边封土掩埋、中部跨空保护方案



图9 洛阳明堂保护建筑方案



图10 洛阳明堂底层平面图

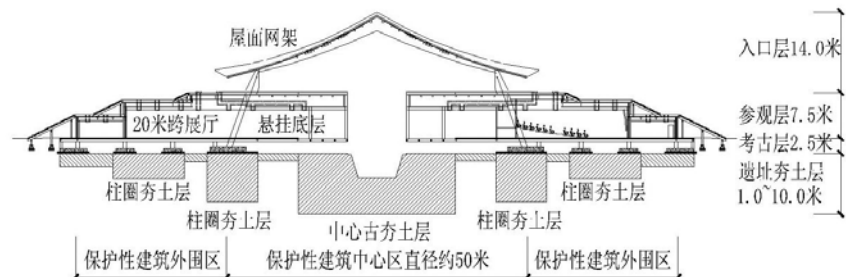


图11 洛阳明堂剖面图



明堂建成外观

跨空建筑保护”思路，在建筑形象上弱化对历史原型的体现。

4 结构工程师的思考

第一种建筑方案在结构难度上要小于第二种方案，但是建筑师不希望采用这种方案，因为这样设计整个建筑物下只有遗址，人员通过木栈道进入核心区域，参观面积很少，遗址展示方式单一，投入回报效果不佳。结构工程师还面临一个问题，基础设计按国家规范要求应该埋入地面下一定深度，洛阳又是湿陷性黄土地区，场地如果有水的话，会出现土层下陷问题，将建筑荷载放置在外围，根据受力要求，基础也需要一定深度来保证安全性，而周边隋、宋遗址混杂，会破坏周边遗址，这是得不偿失的事情。

第二种建筑方案的参观面积仍然较小，集中于中心区，增加了多种展示空间的可能性，建筑师倾向此方案。从结构角度分析，周边掩埋方式最高需10m高，自重就会对遗址表面产生16~25t/m²的荷载，特别是中心区柱坑可能受挤压发生坍塌，毁坏遗址的可能性较大，所以结构工程师不建议采用第二种方案。经过反复考虑，结合遗址勘察情况，结构工程师向建筑师提出几点建议：

（1）既然希望获得更大的展示空间，可以放弃周边掩埋方式，变成可使用空间，有效减少上部结构自重，减少对遗址夯土所产生的压力，这样改变后，建筑面积由两个方案的2 000m²可以增加至9 000m²，给考古增加多种使用可能性。

（2）基于明堂实际建成使用约7年，主夯土层承载过较重的上部荷载，宋代又在其遗址上建设过宫殿，后期随着城市荒废，上部逐步形成约2m多的杂填土，夯土层及下部土层较为稳定且受损轻微，重要的柱圈夯土层在平面上为完整的八边形布置，组成稳定的地基条件。保护建筑高度约22m，底盘尺寸约88m，高宽比为1:4，结构整体抗倾

覆能力很强，可以不将基础埋置于地面下，就像个板凳一样放置在遗址上，只要控制足够大的基础底面积，就能控制夯土所承受的压力。

（3）考虑中心区柱坑的重要性，设计要坚持结构基础不落地原则，可以采用吊挂结构，将接近夯土层的楼层吊挂在入口楼层上，将下层荷载通过上层传递到周边基础，避免本次建设对柱坑产生破坏性影响。

（4）为了避免大型机械对遗址产生影响，结构采用全预制结构，包括钢结构和混凝土结构均采用预制构件在工厂加工，运输到现场，结构设计中就考虑现场人工作业的可能性，做到可人工安装。采用预制结构还可以实现施工可逆原则，拆除时只需将连接节点打开，即可将构件人工拆走。不会出现施工采用现浇混凝土，未来拆除时只能用振动爆破机械来作业的情况，这样设计虽然增加了设计难度和施工周期，但对遗址保护和未来再保护工作提供了更大的余地。

（5）为了实现上述目的，在满足建筑功能的前提下，结合各圈夯土层位置，整体设计以结构为主来布置柱网，中心区吊挂布置是重点，各专业围绕结构布置来进行设计。

在同意上述意见后，结构专业协助确定中心区为跨度45m的八边造型（图9），周边沿夯土圈布置8.0~20.0m柱网，其中20m大跨度柱网是配合建筑师实现明堂“各层象四方青龙、白虎、朱雀、玄武”的象征意义，底层建筑布置见图10，建筑剖面图见图11。

5 基础设计思路

基础设计如果采用常规的现浇柱下独立基础则与“可逆施工”的保护思路有冲突，浇筑和未来拆除过程中产生的震动、冲击必会对遗址产生破坏，经反复对比，结构工程师提出两种预制方案。一种是将基础设计成类似魔方性质的组合体，工厂预制、现场组装，但这种方案对施工接缝处和预应力张拉要求较高，基础底面积过大时难以实

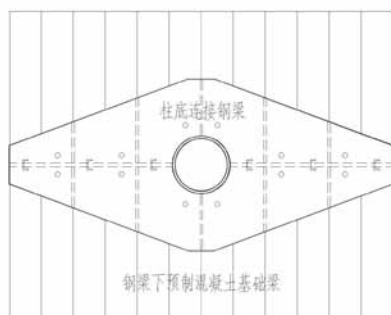


图12 典型基础平面图

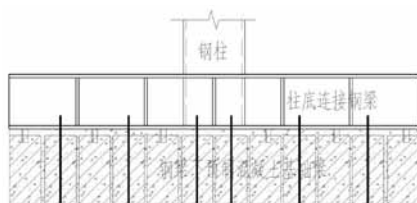


图13 典型基础剖面图



图15 基础施工完成情况

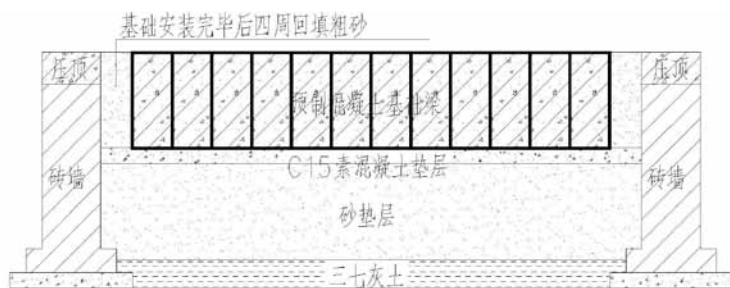


图14 基础与夯土层间铺砂隔离构造

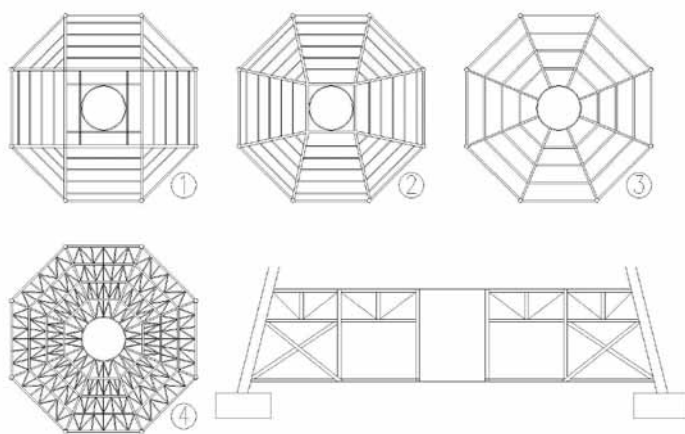


图16 首层入口平台方案演变过程

现；另一种是实施方案参考铁路轨道施工的预制基础方案，即基础由若干预制梁在工厂加工而成，梁重量控制在400kg/m以下，可以通过人工力量将预制梁运送到现场，预制基础梁定位后采用预应力技术将数根梁张紧在一起，形成混凝土基础整体，基础梁受力设计为单向悬挑受力，预应力筋不参与承载受力工作。未来如需拆除建筑时，将预应力筋松弛后，整体基础就恢复成数根基础梁，现场不需要大型施工机械进行基础破碎，不会对遗址层产生冲击，在理论上还可以重复利用进行重建工作。基础平、剖面见图12和图13。

整个场地夯土层上表面有起伏变化，为减少施工对遗址产生破坏，设计要求在进行杂填土层基槽开挖时采用人工挖掘方式，挖至古夯土层上表面时停止基坑下挖工作，继续在此平面上将杂填土层小心揭除至设计所需基坑范围，这部分工作由考古单位参与实施，确保夯土层保存完好。基坑准备好后，在周边用砌体砌筑基坑维护墙，在内部用细砂铺底用于分隔古夯土和混凝土基础，铺砂法也是考古界常用的保护方式。结合整个场地夯土层表面标高统计，铺砂厚度控制在20~60cm之间，使基础底标高处于同一标高上，典型处理方法见图14。计算基础底面积时考虑回填砂荷载影响，在预制基础梁安装完毕后用细砂回填基础与砌体维护墙之间的空间，细砂的特性可以适应上部结构对基础变形的要求。维护砖墙外形成的区域待上部建筑施工完毕后，不进行回填土施工以减少夯土层承担的荷载。考古队可以有选择地进行杂填土揭除工作，形成室内保护环境，利用基础和垫层形成的高度，在参观层与夯土层间留出层高约2.0m的空间，以使建筑物在投入使用后，可以继续在这些区域进行考古研究工作。未来如需拆除

建筑，砌体拆除对遗址影响很小，维护墙内外夯土层在建筑使用期间受保护程度是一致的，建成效果见图15。

6 主体结构设计思路

主体结构根据预制思路采用钢结构，外围区柱网较为规则，除层高和柱网变化较多外，基本为常规设计。中心区结构设计是明堂保护建筑的重点，其他专业都需要围绕结构思路进行设计。

中心区根据明堂遗址古夯土层平面布局，最终将主入口平台层设计成八边形，中心跨度约44m，周边共8根钢柱支撑。为便于观众在该层俯瞰明堂中心柱坑，平台中部设直径约10m的中空展示口。结构工程师经多方案对比，决定放弃常规落柱设计方案，采用悬挂设计方案，即底层参观层悬吊于上部入口平台层，两层荷载通过入口平台层传递给周边8根支撑柱，结合建筑造型和第二圈柱础夯土层尺寸，支撑柱为斜柱，斜柱下布置基础，其位置正好位于第二圈柱础夯土层，也是夯土层最厚的区域内，柱脚中心直径约50m，荷载最大的柱基础离中心柱坑的距离在15m以上，中心古夯土层不承担建筑物荷载，使明堂遗址最重要的保护区域呈现最自然的状态。

因诸多要求集于一身，入口平台层成为本工程设计的最大难点，设计之初有两种结构方案：

(1) 井字交叉桁架方案。入口平台在垂直方向各设两道主桁架，在井字中心用次桁架形成中心缺口，其他区域用次梁进行分割布局，底层通过吊柱与桁架节点连接。这种方案在计算上是成立的，但有几个问题难以解决：一是建筑设计以八边形为主，井字形布置与建筑形象冲突，影响建筑展示以及竖向交通布局，对建筑功能限制较



图17 入口平台安装完毕后情况



图18 预制楼板安装情况



图19 从入口平台向下看遗址中心柱坑

多；二是八根斜柱在空间上呈放射状布置，桁架竖向布置与之相交时上下节点存在角度差，桁架连接与结构计算不协调；三是大跨度两层荷载使上下弦内力较大，连接节点设计不容易满足抗震设计要求；四是主要次梁跨度超过16m，结构自重较大，特别是中心开口区域对竖向刚度较为敏感，增加此部分截面会导致在大跨结构中部荷载增加，不经济；五是主桁架弦杆因上述原因截面过大，影响建筑竖向布置，施工时必须采用大型机械进入夯土层区域进行安装。

(2) 采用悬支-仿网架方案。此方案由第一种方案通过结构概念分析逐步演变而来，首先减少中心开口区的跨度，将主桁架由直线变为曲线，直接由桁架承担中心开口区，避免因中心开口区刚度要求增加结构自重；其次考虑设置中心刚环的方法，将桁架由交叉布置改为放射布置，这样做可减少刚环周边的次梁跨度和自重。但是刚环直径与平台直径之比仅1/4，根据以往的工程经验，传递8根主桁架内力对环的刚度要求很高，从结构效率分析是不经济的，同时该方案仍未解决桁架与斜柱连接节点内力过大的问题，整个建筑物的安全性取决于8个主要节点，任一节点发生破坏都会引起整个结构的破坏，结构安全性和抗连续倒塌的能力很低。参考网架设计思路，增加杆件数量分散桁架结构内力减小杆件截面，由桁架一根杆件连接演变为多杆件连接，节点设计也得到简化。计算发现网架本身高度不满足两层荷载使用要求，考虑利用底层楼层高度来提高网架刚度，即入口平台层做2.0m高网架层，沿8个轴线方向设置层间斜拉杆形成悬支结构，利用底层平台形成整个结构的受拉刚环，底层层高4.5m，有效提高了整体结构的竖向刚度，杆件内力比第一方案减少很多，而上层平台因采用网架形式刚度分布较为均匀，不需要设置较为明确的受压刚环，网架杆件截面多数控制在200mm以内。在进行竖向振动频率分析时，增加层间斜压杆。方案演变过程见图16，仿网架是指上层网架构件间连接没有采用传统网架节点形式，杆件内力决定部分节点球直径过大，已经影响到建筑层高布置，为此专门设计托盘形节点控制节点高度，见图17。施

工时先安装上层网架，根据设计计算值起拱并进行临时支撑，待下部悬支构件安装完毕后，撤去临时支撑，使悬支构件受力。

为了实现第二种方案，结构工程师和建筑师从2010年1月开始，历经4个月反复交流修改，才最终将方案演变成实施成果。

7 预制楼板设计思路

钢结构楼板在一般设计中多采用压型钢板组合楼盖，在施工中会有湿作业工序，对遗址夯土层和湿陷性黄土地基承载力都会有不利影响，未来拆除工作需要动力破碎。综合考虑本工程特点，主体结构计算对楼板平面内刚度要求较低，最终采用预制楼板方案：预制板下预埋与钢梁焊接用钢板，板上预埋板间焊接用钢板，安装就位后通过焊缝与钢梁和其它预制板连接为整体。预制板宽度控制在500~600mm，剖面采用槽型板形式以减少板自重，最重板块重量不大于400kg，可以人工进行搬运安装，现场安装情况见图18。

8 结语

明堂遗址保护性建筑在建筑师和结构工程师的共同努力下，打破常规设计思路，综合各种可实现的技术手段，以不埋基础、降低基底反力、细砂隔层、预制基础等方式最终实现了不破坏遗址古夯土文物的设计目标，为保护建筑提供了更多参观面积和可挖掘的考古面积，使遗址的真实性和完整性得到有效保护，给后代进行遗址保护调整和完善留有更大的操作余地。

明堂保护建筑设计成功为古建保护项目开创了一种可持续发展、多重利用、绿色用材的设计方法，为我国大遗址保护工作提供了一种创新的保护与展示模式。项目现外观已建成，正在进行内部装修，计划2012年4月1日正式开放。▲

参考文献

- [1] 唐东都武则天考古发掘简报[M]. 洛阳:社科院考古洛阳唐城队,1988.
- [2] 隋唐宫城明堂遗址区发掘简况[M]. 洛阳:社科院考古洛阳唐城队,2009.

第一作者简介

王昌兴，北京清华城市规划设计研究院结构总工程师、优化中心主任，教授级高工，一级结构师，全国注册结构师考试专家组成员，建设部绿色建筑评价标识专家委员会委员。负责设计、优化了许多有影响的项目，其中北京中环世贸中心获第四届全国优秀建筑设计三等奖。主编、参编、审阅了有关计算、设计、软件应用、绿色建筑的多本标准、手册、指南、教程等，其中《混凝土结构计算手册》1993年获第二届全国优秀建筑科技图书一等奖。

