

机械切割在土遗址搬迁保护中的应用研究

蔡乐刚, 朱 杰, 陆 珏, 俞明亮
(上海市房地产科学研究院, 上海 200031)

摘要: 传统的人工掏挖装箱搬运分块过多, 为尽量减少对土遗址本体的干预, 本研究提出了采用机械切割方式对土遗址进行分块的方法。以上海广富林文化遗址“F12 房址”搬迁保护工程为背景, 设计了机械切割设备, 试验初探了机械切割在土遗址搬迁保护中的应用, 对水平切割速度、牵引力及设备等相关技术进行了针对性研究, 并改进机械切割方案, 成功应用于房址整体搬迁保护工程。研究表明: 机械切割技术可应用于土遗址搬迁保护, 有效减少分块数日, 降低搬迁作业对遗址的损伤, 可为相似的文物保护工程提供有益借鉴。

关键词: 土遗址; 搬迁保护; 机械切割; 切割设备

中图分类号: K928.5 **文献标识码:** A

DOI:10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.2016.01.012

0 引言

依《中国文物古迹保护准则》规定要求, 文物古迹必须原址保护, 只有在发生不可抗拒的自然灾害或因国家重大建设工程的需要, 使迁移保护成为唯一有效的手段时, 才可以原状迁移, 易地保护; 对于已发掘的古文化遗址, 当无条件原址保存的构件, 才允许易地保护。同时, 《中华人民共和国文物保护法》指出, 当建设工程不能避开不可移动文物时, 对文物保护单位应尽可能实施原址保护, 当无法实施原址保护时, 须报相关部门批准后才予以实施迁移异地保护。

土遗址作为不可移动文物的组成部分, 应依照文物保护原则进行原址保护, 尽可能保存遗址本体及周边环境, 不予过多人为干扰。然而, 现实中大量土遗址经抢救性发掘后遭破坏的现象十分普遍, 或者所处环境恶劣造成遗址严重破坏, 不得不进行保护性迁移异地保护。关于土遗址搬迁保护, 目前基本采用小区域人工掏挖装箱搬运方式, 例如长沙国际金融中心建筑工地考古遗址迁移保护工程^[1]、殷墟车马坑异地搬迁保护工程^[2]、河曲坪头遗址新石器时代房址搬迁工程^[3]、成都市新都区新石器时代晚期土坑墓提取保护工程^[4]、南京江东门遗址搬迁工程^[5]、三峡巫山新石器时代遗址土坑墓整体切割与搬迁^[6]等。采用此方法基本不会造成土遗址严重破坏, 可以做到分时、分段缓慢执行, 但是过

多分块、拼接会导致遗址原状有较大改变。

依文物最小干预原则, 土遗址应整体一次性搬迁, 但有时存在困难, 需分块搬迁。因此, 如何最大限度地降低分块数量, 最大程度保护遗址原貌, 是一个具有现实意义的研究课题。本研究基于上海广富林文化遗址“F12 房址”搬迁保护工程, 设计了一种应用于土遗址搬迁保护的机械切割设备, 进行了全尺寸遗址土体模型切割分块试验, 初步探讨了机械切割在土遗址搬迁保护的应用情况, 并成功应用于房址搬迁保护工程, 极大地降低了分块数量, 更好地保护遗址。

1 上海广富林“F12 房址”概况

广富林文化遗址位于上海市西南部的松江区方松街道广富林村, 于1959年发现, 并于2013年被确定为全国重点文物保护单位。

因松江新城工程建设规划范围涉及广富林遗址现保护范围外围区域, 根据文物保护法规定要求, 于建设施工前, 由上海博物馆考古部主持, 对建设规划范围涉及区域进行了大规模的抢救性考古发掘。

“F12 房址”是2012年考古发掘过程中发现的一座保存较好的广富林文化的地面式双间排房遗址, 面积约52m², 连同附属遗迹其总面积在200m²以上, 除房子主体外还有许多附属遗迹, 如石琮、陶罐、鼎、缸、罐等, 以及古人类居住活动痕迹。上海市文物局组织专家对房址进行了现场论证, 一致认为“F12 房址”是广富林文化重要的发现, 具有很高的

收稿日期:2014-11-25; 修回日期:2015-08-13

作者简介:蔡乐刚(1980—), 男, 2005年毕业于同济大学, 硕士, 高级工程师, 主要从事房屋安全和历史建筑保护方面的研究, E-mail: cailegang@126.com

学术价值,考虑遗址保护和工程建设需求,提出并确定了保护意见:考古发掘后首先采取暂时性回填保护,并为了协调开发建设及更好保护、展示遗址风貌,进行抢救性搬迁异地保护(图 1)。



图 1 “F12 房址”搬迁保护区域
Fig. 1 Relocation area of “F12 site”

2 机械切割分块试验

机械切割主要应用于机械工业中,是板材粗加工的一种常用方式,其实质是被加工的物体受剪挤

压而发生剪切变形并剪裂分离的工艺过程。土遗址搬迁保护需将上层遗址土体与下部土体分离,因此,设计采用锯状绳锯切割土体的方式将土体分割,即水平切割与竖向切割将遗址土体分割成独立单元。

试验场地邻近“F12 房址”,按房址分块搬迁设计尺寸制作全尺寸土体模型,尺寸为 3.0m×8.0m,试验切割深度 1.0m,最大限度模拟遗址切割分块作业。

2.1 房址土体基本性质

在实施切割之前,为了解房址所在场地土层性质及房址土体特性,进行了现场地质勘查测试及取样室内土工试验。

地质勘查结果显示,房址所在场地揭示土层共分 5 个工程地质层,6 个地质亚层。依考古发掘,“F12 房址”位于第③地质层,即灰色淤泥质粉质粘土,呈高压缩性,流塑状态,并富含云母及有机质,夹薄层砂,土质较复杂。

取样试验按《土工试验方法标准》GB/T 50123—1999 对遗址土体进行测试分析,如表 1,可以发现,土样含水率达 25.4%,极为潮湿,根据颗粒分析显示,遗址土体属粉质粘土,且掺杂少许瓷器、瓦片等杂质。

表 1 土样基本性能指标
Table 1 Basic physical property indexes of site soil

测试项目	含水率/%	湿密度/g·cm ⁻³	干密度/g·cm ⁻³	孔隙率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数/I _p	土体性质
测试结果	25.4	1.71	1.36	20.27	40.36	24.55	15.81	粉质粘土

2.2 机械切割设备设计

由于机械切割分块土遗址尚无相关参考案例,故查阅相关文献资料^[7~11],自行设计了机械切割方法及机械设备。

机械切割设备主要包括龙门架、牵引机组、切割系统、插入钢板及钢梁托架等,设计参数如下:①龙门架,为门字形钢框架;②钢梁托架,为支撑、承载构件,根据土体分块尺寸设计为 9.56m×4.0m;③插入钢板,随切割作业牵引插入土体,待切割分块后,反向牵引钢板使搬迁保护土体一同平移至钢梁托架。其中,插入钢板采用双层形式,单层钢板尺寸为 9.5m×3.5m×8mm,钢板间涂抹润滑油,并均匀施洒 2mm 直径球形钢珠以减小摩擦力;④牵引机组,主要包括卷扬机、滑轮组、拉环、钢锚柱。其中,考虑土体密度、土体与钢板间摩擦系数及安全系数,取估算大值,设计牵引机组最大牵引力为 660kN;拉环采用 U 形拉环,并粘贴应变片以测定牵引力;⑤切割系统,主要包括钢丝锯绳、锯绳电机系统、水平—垂直转向轮、垂直导向螺杆和配重装置。钢丝锯绳作为土体切割的直接工具,采用钢绞线经捻制节点制

成,钢绞线直径取 8mm,节点采用高硬度串珠编制,外径 10mm,间距 50mm;锯绳电机系统由电机、变速箱及圆形转轮组成;垂直导向螺杆主要用于竖向切割作业,通过调节螺杆可竖向升降锯绳竖向切割土体;配重装置主要调节锯绳收紧力,水平切割作业时设定为 350kg,竖向切割时设定为 200kg。机械切割设备具体如图 2 和图 3。



图 2 牵引机组
Fig. 2 Traction units

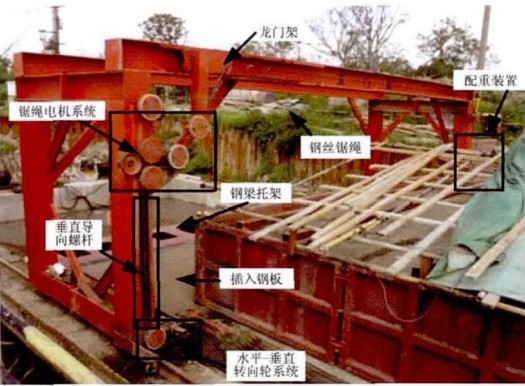


图 3 切割系统
Fig. 3 Cutting systems

2.3 试验实施设计及现象

机械切割分块土遗址主要包括水平切割和垂直切割,将遗址土体分割成独立单元,在切割过程中进行表面变形监测,以便及时发现遗址土体是否产生开裂等破坏,调整切割控制参数。按照设计,机械切割主要控制参数设计如下:①钢丝绳锯绳与插入钢板间的初始距离 350mm;②水平切割速度设为 20mm/min 左右;③牵引步进值 50mm,即牵引机组牵引龙门架及插入钢板前行,单次前行 50mm;④垂直切割速度设为 20mm/min。具体实施流程如图 4 所示。

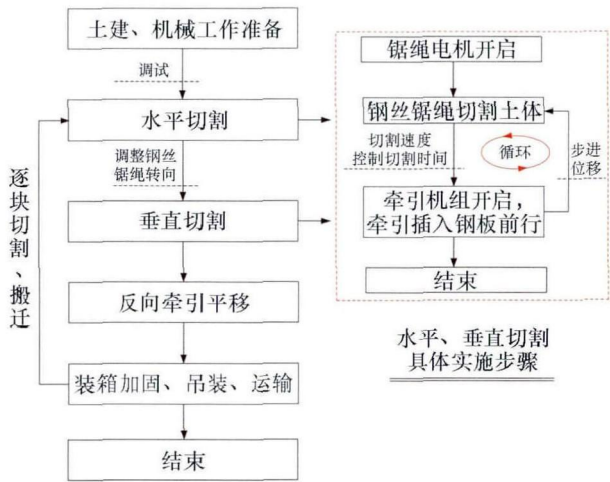


图 4 土遗址机械切割搬迁保护实施流程
Fig. 4 Process of protective relocation by machine cutting method for earthen sites

在切割过程中,当牵引至标识刻度 2.05m 时,一侧卷扬机失控导致该侧钢板强制牵引至约 2.15m 才停止。至此,反向将此侧钢板牵拉至标尺刻度 2.05m 处,重新启动切割作业。此过程造成土体表面开裂严重,生成 2 条横向主裂缝,长度分别达 3.2m 和 2.7m,表面最大裂缝宽度达 19.8mm,1 条

纵向斜裂缝,长约 0.8m,表面最大裂缝宽度达 5.2mm。

3 试验结果分析

除观察机械设备在切割过程中的适用性,还针对性地对水平切割速度、牵引力随钢板插入深度的变化规律等关键点进行了监测与分析。

3.1 水平切割速度

切割速度测定方法是测量牵引步进值(设计值为 50mm,以实测为准)与切割完成该区段时间,通过调整步进值与切割时间以改变切割速度,使切割效果及效率达最优化,图 5 为试验水平切割速度与切割深度的关系图,其中切割深度为标识刻度值。

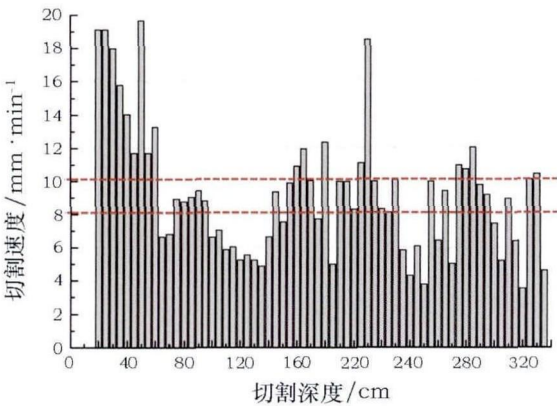


图 5 水平切割速度与切割深度关系
Fig. 5 Relationship between horizontal cutting speed and cutting depth

从图 5 及试验过程看出,切割至标识刻度 0.5m 之前,切割速度按设计值 20mm/min 基本可行,但后期便出现了问题,主要是钢丝绳锯绳与钢板发生触碰,致使切割卡顿,甚至导致锯绳断裂。

考虑尺寸特点,可将钢丝绳锯绳一定程度上认为是理想柔性的,根据柔性绳索在均布恒荷载作用下,受力区段绳索位移曲线为二次抛物线的特点,并假定锯绳对称,可建立锯绳变形模型。基于卷扬机牵引龙门架与钢板前行的瞬间,分析锯绳位移变化情况,如图 6 所示, a 、 b 点为水平—垂直转向轮切点, c 点为土体边缘与锯绳交点, d 点为锯绳中点, a' 、 b' 、 c' 点分别为瞬时牵引后对应点, d_3 为牵引前锯绳中点 d 与钢板之间的距离。当牵引瞬时前移步进值 λ_0 (试验设计为 50mm),则 a 、 b 点将同时前移 λ_0 , c 点前移 λ_1 (小于 λ_0),而 d 点将基本固定不动,此时,锯绳与钢板间距离变为 $\Delta = d_3 - \lambda_0$ 。若 $\Delta < 0$,则锯绳与钢板触碰;若 $\Delta > 0$,则锯绳与钢板不触碰,故遗址切割分块实施需保证 $\Delta > 0$,避免锯绳与钢板产生

碰撞。 d_3 直接测定比较困难,但试验实测发现其与 d_1 有一定相关性(d_1 为 c 点与插入钢板间距离,测量较简单),所以可通过测定 d_1 来反应 d_3 ,决定是否可下一阶段牵引,试验测定分析确定 d_1 为 270mm。

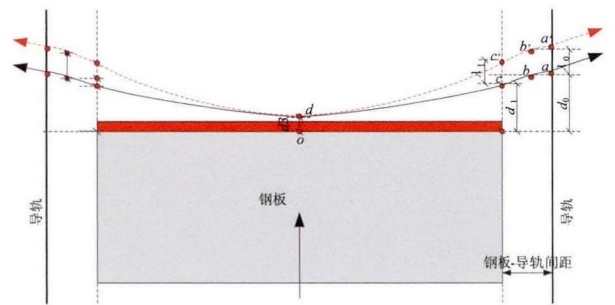


图 6 钢丝锯绳形态变化示意图(牵引瞬间)

Fig. 6 Diagram of shape change of wire saw (traction moment)

从试验过程观察可发现,基于设计的机械切割设备,设定锯绳与插入钢板间的初始距离 350mm,水平牵引步进值 50mm,延长锯绳切割时间以降低水平切割速度至 8 ~ 10mm/min,可有效避免锯绳与钢板触碰,且保障土体切割效率。

3.2 牵引力监测

如图 7 所示,随切割深度增大,起动牵引力和持续牵引力均增大(其中区段 2. 05 ~ 2. 20m 由于事故原因,未将监测值放入图表),但两侧牵引力有较大差异,测点 P1 侧起动牵引力与持续牵引力均相应较测点 P2 侧大,这主要原因是两侧卷扬机牵引控制不同步,造成两侧牵拉不对称。在整个过程中,测点 P1 的起动牵引力与持续牵引力最大值分别为 331. 87kN、234. 68kN,测点 P2 侧最大值则分别为 220. 03kN、163. 71kN,均发生于钢板切入土体尾段,并且,当牵引至标识刻度 2. 80m 时,P2 侧卷扬机提

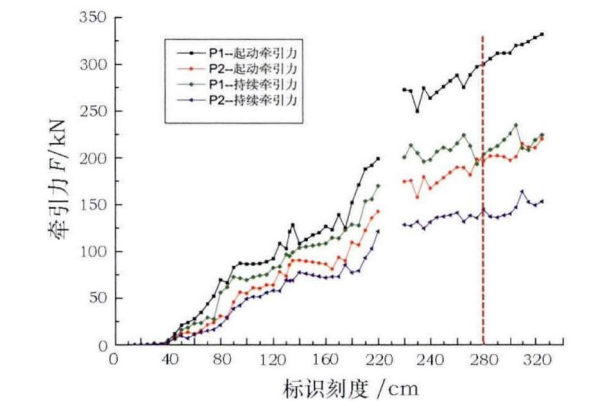


图 7 牵引力监测结果

Fig. 7 Traction monitor results

前达到极限状态。从图中还可以看出,事故后钢板回拉再重新牵引对两侧牵引力分配有了较大的影响,造成 P1 侧牵引力有较大提升。因此,在遗址切割分块过程中应严禁发生此类事故。

牵引机组牵引龙门架及钢板前行,牵引力主要克服钢板与土体间摩擦力及土体对钢板前端的阻滞作用。文献[7]指出,影响土壤阻力的各项因素,于切土器方面,主要是其工作表面性质、材料性质,重心位置、牵引线方向以及速度;在土壤方面,主要是土体的组成和含水量。现将两侧测点的起动牵引力和持续牵引力分别叠加,并假定牵引阻力与土体质量呈线性关系,则拟合牵引力与切割深度的关系如图 8 和图 9,横坐标为钢板插入土体深度,即标识刻度减去锯绳与钢板初始间距 350mm。

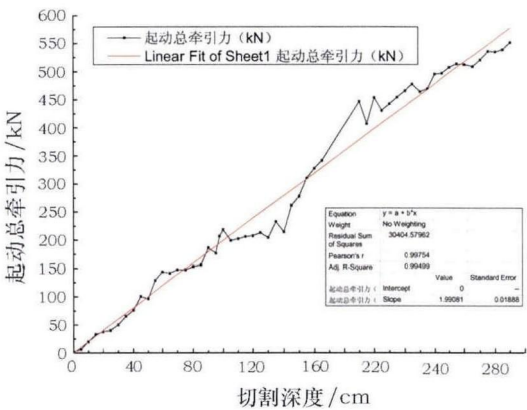


图 8 起动总牵引力拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of total starting tractive force

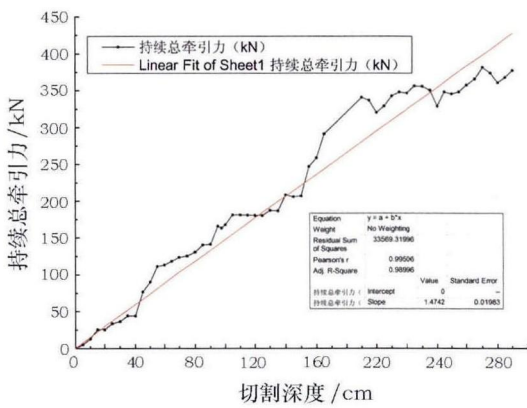


图 9 持续总牵引力拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of total continuous tractive force

代入土体密度、尺寸等参数,拟合牵引力与土重之间的关系:

$$F_1 = 1.4850F_N \tag{1}$$

$$F_2 = 1.0995F_N \tag{2}$$

式中, F_1 为起动牵引力(kN), F_2 为持续牵引力

(kN), F_N 为切割上部土体重量(kN)。

定义起动牵引总阻力系数 μ_1 , 持续牵引总阻力系数 μ_2 , 则:

$$F_1 = \mu_0 F_N; F_2 = \mu_1 F_N \quad (3)$$

式中, $\mu_1 = 1.4850$, $\mu_2 = 1.0995$ 。

3.3 机械设备

试验发现, 机械切割设备设计存在一定的不足, 需进一步改进, 具体如下: 基于牵引力监测及分析, 牵引机组可参照式(1)乘以安全系数确定, 且卷扬机控制系统应稳定安全; 依设计采用的钢丝锯绳切割土体效果欠佳, 故对其进行改进, 增大钢绞线直径和节点编制外径, 增大了两者高度差, 以及适当减小节点间距, 切割土体效果明显提升, 且未对土体切割产生明显影响; 试验所用钢梁托架在反向牵引平移过程中出现弯扭变形, 尚需提高整体刚度和强度。

4 应用情况

根据文保和考古部门研究确认, “F12 房址” 搬迁保护主体部分, 总面积约 130m^2 , 具体尺寸约 $16.8\text{m} \times 7.8\text{m}$, 采用机械切割分块方式, 将房址逐块切割后实施搬迁, 特别地, 切割作业应保护房址的重要遗迹部分。基于全尺寸土体模型切割试验, 设计切割分块共 6 块, 深度为 1.0m , 如图 10。

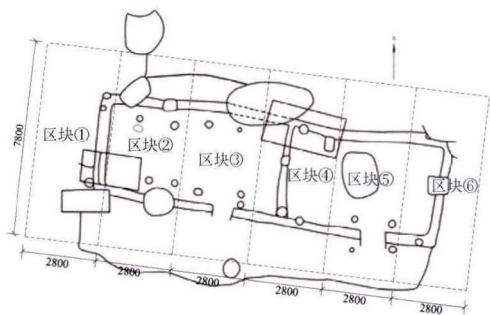


图 10 “F12 房址”机械切割分块示意图

Fig. 10 Diagram of machine cutting partition of “F12 site”

4.1 设备及关键控制参数设计

基于试验研究, 对机械切割方案和设备进行了优化与改进, 确定了相关关键控制参数: ①牵引机组最大牵引力增大至 960kN , 且设置卷扬机独立操控系统; ②钢丝锯绳调整钢绞线直径为 12mm , 节点外径 18mm , 即节点高差为 3mm , 相邻节点间距调整为 180mm , 并相应调整电机系统; ③牵引步进值为 50mm , 钢丝锯绳与钢板间的初始距离为 350mm , 水平切割速度控制为 0.5m/h 左右; ④垂直切割采用先从上往下切割方式, 下切深度达 0.4m 后, 再转换为从下往上切割方式, 且此时步进升高高度控制为

20mm 。

4.2 “F12 房址”机械切割分块实施

待房址表面加固完成后, 依优化设计的切割方案进行分块作业。为防止最末区块切割过程中发生剪切或坍塌破坏, 设计反力支撑进行加固(图 11)。



图 11 反力支撑加固

Fig. 11 Reinforcement by steel strut

房址机械切割分块流程与试验基本一致, 在相邻区块交接处(即垂直切割预留缝隙处)切割需特别注意: 锯绳切割至预留缝隙时, 插入钢板距缝隙尚存一定距离, 需继续向前切割, 使锯绳全部处于缝隙另一侧, 松开龙门架与插入钢板的连接螺栓, 单独反向牵引龙门架, 将钢丝锯绳牵引至缝隙中心, 转换锯绳切割方向并调节垂直导向螺杆, 垂直向上切割约 100mm 后停止; 然后直接牵引插入钢板前行至切缝中间, 水平切割完毕, 调整设备, 进行竖向切割作业。“F12 房址”机械切割分块顺利完成, 后继进行反向牵引平移、装箱加固、吊装、运输, 主要实施过程如图 12。

从切割过程可发现, 采用所设计的机械设备及切割方法实施效果良好, 所有区块房址土体均未发生掉块、坍塌现象, 均保持良好的完整性。除区块①



(1) 机械切割准备; (2) 水平切割;
(3) 垂直切割; (4) 反向牵引平移



(5) 装箱加固; (6) 吊装; (7) 运输; (8) 切割完毕

图12 “F12 房址”机械切割分块搬迁保护过程

Fig. 12 Main process of machine cutting of “F12 site”

和区块③房址土体因切割操控不同步和锯绳断裂等原因导致较严重开裂外,其余区块房址土体均未产生明显开裂。其中区块①产生1条主裂缝,位于区块房址土体中部,总长约2.8m,最大表面裂缝宽度约22mm;区块③产生2条主裂缝,最大表面裂缝宽度分别约18mm和15mm,如图13。



图13 区块1号与3号房址土体开裂

Fig. 13 Soil cracking of Block 1 & 3 of “F12 site”

5 结论

本研究以上海广富林文化遗址“F12 房址”搬迁保护工程为依托,设计了机械切割分块方案与设备,试验研究了机械切割在土遗址搬迁保护中的应用,并改进优化,成功应用于“F12 房址”搬迁保护工程。通过研究,得出以下结论:

1) 采用机械切割方式对土遗址进行水平、垂直切割分块是可行的,能减少分块数目,有效降低搬迁对遗址的影响,更好地保护遗址原状。

2) 采用机械切割方式分块土遗址须保证牵引设备的牵引动力和操控系统稳定性,不可反向牵拉钢板,否则会导致遗址土体变形开裂等损伤。

3) 插入钢板采用双层设计方式,且两者间涂抹润滑油及均匀铺设球形钢珠,能有效降低钢板间摩擦力,保证钢板与上部土体一同牵引平移至钢梁托架。

4) 因各遗址存在差异性,当采用机械切割方

式时,应于遗址本体正式实施前,通过试验研究其适用性并确定相关控制参数。

5) 遗址最末区块通过设置反力支撑加固可有效防止机械切割时发生剪切破坏和坍塌。

参考文献:

- [1] 阳帆,毛志平. 南方潮湿地区考古遗址迁移保护初探——以长沙国际金融中心建设工地考古遗址迁移保护工程为例[J]. 中国文物科学研究, 2012, (2): 63-69.
YANG Fan, MAO Zhi-ping. Conservation of archaeological sites in southern humid areas by relocation: a preliminary examination of the site discovered at Changsha International Financial Center[J]. Chin Cult Sci Res, 2012, (2): 63-69.
- [2] 詹长法,冈田健. 土遗址保护研修报告[M]. 北京: 文物出版社, 2010.
ZHAN Chang-fa, GANG Tian-jian. Research report of earthen site protection[M]. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 2010.
- [3] 韩炳华,张喜斌,郭银堂. 河曲坪头遗址新石器时代房址的现场保护与提取[J]. 文物保护与考古科学, 2012, 24(3): 7-13.
HAN Bing-hua, ZHANG Xi-bin, GUO Yin-tang. The on-site removing and protection of the Neolithic house foundation in Pingtou site, Hequ, Shanxi[J]. Sci Conserv Archaeol, 2012, 24(3): 7-13.
- [4] 李刚,王波. 成都市新都区新石器时代晚期土坑墓提取与保护[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(1): 65-68.
LI Gang, WANG Bo. The extraction and protection of late Neolithic pit graves in Xindu County, Chengdu City[J]. Sci Conserv Archaeol, 2010, 22(1): 65-68.
- [5] 李克彪. 土遗址搬迁保护技术研究——南京市“江东门遗骸遗址”搬迁保护技术[C]//中国文物保护技术协会第四次学术年会论文集, 2005: 228-237.
LI Ke-biao. Research on the relocation and conservation technology of earthen site - Relocation and protection technology of the remains of Jiangdongmen site in Nanjing[C]//Proceedings of the Fourth Symposium Chinese Association for Preservation Technology of Cultural Relics, 2005: 228-237.
- [6] 张光敏. 土坑墓整体切割与搬迁[J]. 文物保护与考古科学, 2004, 16(3): 55-57.
ZHANG Guang-min. On the technology of earth-pit tomb severing and moving[J]. Sci Conserv Archaeol, 2004, 16(3): 55-57.
- [7] 潘君拯. 农业机械学上的土壤力学性质问题[J]. 南京农学院学报, 1957, 2: 127-144.
PAN Jun-Zheng. Problems of mechanical property of soil in agricultural mechanics[J]. J Nanjing Agr Univ. 1957, 2: 127-144.
- [8] 李孔明. 预切槽工法修建隧道的模型试验及结构设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
LI Kong-ming. Model test research on construction of tunnel with pre-cutting method and structure design research[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [9] Leendert V. Stone cutting machinery[P]. United States, 1888895, 1932.

- [10] Richard D, David L, Clifford D, *et al.* Fluid – cooled apparatus for cutting concrete material and the like [P]. United States, 4870946. 1989.
- [11] Ikuta S, Masuda Y, Matsui K, *et al.* Development and application of ground improvement machinery chain conveyor cutter[J]. J Novel Carbon Res Sci, 2013, 7: 18 – 25.

Research on the application of machine cutting technology to relocation and protection of earthen sites

CAI Le – gang, ZHU Jie, LU Jue, YU Ming – liang

(Shanghai Real Estate Science Research Institute, Shanghai 200031, China)

Abstract: To minimize the interference and damage to earthen sites during relocation, a partition method for machine cutting is proposed for the first time, with consideration of traditional small – block artificial digging and partitioning technology. In connection with relocation of the Guangfulin culture site “F12 site”, special cutting machinery was designed and produced. This paper presents a preliminary study on the application of mechanical cutting in earthen site relocation projects with a particular focus on key technology, such as horizontal cutting speed, traction force and mechanical machinery. This technology was successfully applied in the relocation of “F12 sites” project. The results show that machine cutting technology can be applied to site relocation and protection. It can reduce number of the partitions and damage during relocation without obviously changing the earthen site. This work provides support and reference for similar projects.

Key words: Earthen sites; Relocation protection; Machine cutting; Cutting machinery

(责任编辑 马江丽)