



南方文物 2018.01

良渚古城中“铺底垫石”营建技术分析



徐珂

(北京清城睿现数字科技研究院有限公司)



马志平

(北京清城睿现数字科技研究院有限公司)



王宁远

(浙江省文物考古研究所)



贺艳

(北京清城睿现数字科技研究院有限公司)

摘要:良渚文化及其所代表的良渚文明距今约 5300—4300 年,良渚古城城墙是良渚遗址中重要的城市建设遗存,其建设活动标志着良渚古人对核心宫城区域的确认和围合,是对可利用的自然地貌进行人工干预结果。建设方法展示出良渚古人已经具备丰富工程经验和利用自然资源的能力。本文结合考古资料、现场调查和工程原理,对其中具有代表性的“铺底垫石”工艺进行工程技术分析,判断古人利用自然进行工程实践的水平。

关键词:良渚遗址;营建技术;铺底垫石;地基加固;施工平台

Abstract: The Liangzhu culture dates back to 5300 to 4300 years ago and is a representative of Liangzhu civilization. The city walls are essential components of the city construction and are important relics of Liangzhu culture. The construction of the city wall represents the recognition of city center by Liangzhu ancients. It is a result of human intervention on the available natural geotechnical conditions. The method of the construction proves that Liangzhu ancients have rich engineering experience and the ability to make use of natural resources. Based on archaeological data, field investigations, and engineering principles, this study investigates the technique of "Padding pad stone" to evaluate the level of engineering practice of the Liangzhu ancients.

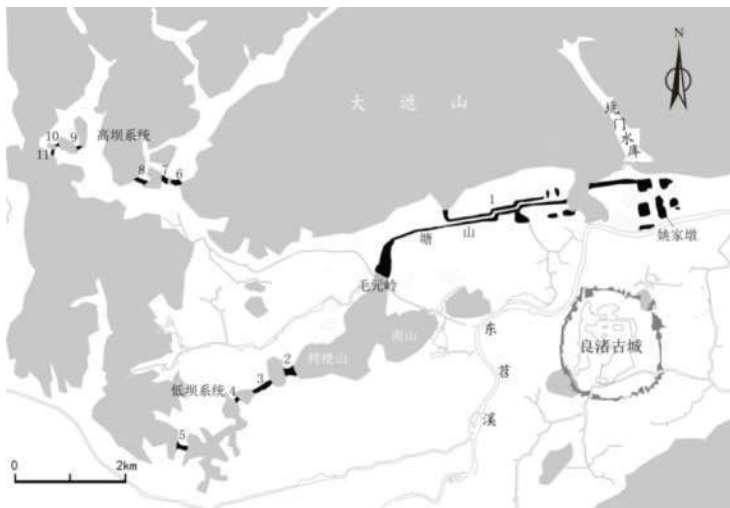
Key Words: Liangzhu site; Construction technology; Padding pad stone; Foundation reinforcement; Construction platform

良渚文化及其所代表的良渚文明距今约 5300—4300 年,分布于环太湖流域,良渚古城是目前发现唯一良渚文化时期的都邑级城市,其位于浙江省杭州市余杭区瓶窑镇,处于环太湖地区偏南部的山地平原交界处,其北、西、南三侧均是东天目山余脉的低丘。良渚古城城市系统从空间上包涵四重结构,从中心向外依次为莫角山宫城、王城、外郭以及西北部山地高低两级水坝构成的水利系统,其控制范围达 100 多平方千米(图一)。

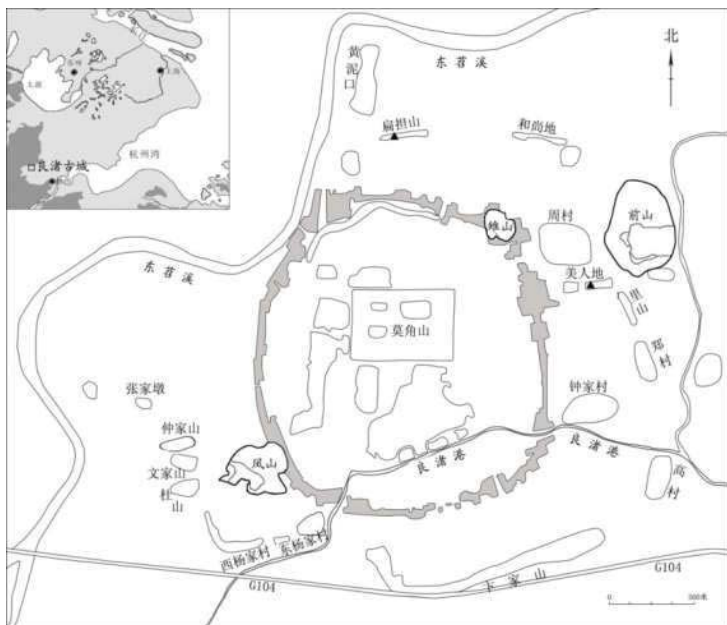
良渚古城的王城城墙略呈圆角长方形,平面尺

寸南北长 1800~1900 米、东西宽 1500~1700 米,城内总面积达 290 多万平方米。古城墙内外都有壕沟,并叠压着良渚文化堆积,四面城壕与打破古城墙的灰坑出土陶片年代一致,属于良渚文化晚期。这是长江中下游地区首次发现良渚文化时期的城址,也是中国目前所发现同时代规模最大、水平最高的古城址,堪称“中华第一城”(图二)。

浙江考古工作者在对良渚古城持续考古发掘中,逐步发现古城城墙底部有“铺底垫石”的特征,城外水利系统低水坝中最长的塘山水坝,也采用底部



图一 良渚古城系统分布图



图二 良渚古城及外郭结构



图三 南城考古现场照片

铺石工艺。塘山水坝总长约 4000 米,良渚古城墙周长 6000 米,经统计城墙下“铺底垫石”总面积达 30 万平方米左右。另外每面城墙中各有两个位置没有“铺底垫石”,推测这些部位为古水城门。由于后期人为活动破坏,城墙遗址目前仅部分地段在地表以上还残留 4 米多高遗存^①。

为探讨早期技术水平和施工能力,本文结合考古资料、现场样品和工程原理,对其中具有代表性的“铺底垫石”工艺进行工程技术分析,判断古人利用自然进行工程实践的水平。

1、城墙结构和“铺底垫石”工艺

在良渚古城墙四周各试掘地点所获得的地层剖面,总体结构比较一致。除城门和处于城墙转角的凤山、雉山及黄泥山等硬质地基位置外,墙体做法是先在生土面上铺垫一层 10~20 厘米厚的胶泥,之上铺放块石,铺石面宽度多为 40~60 米,城墙在“马面”凸出的位置宽度可达百米,大部分地方铺石面两端下斜,中部平整,中部之上堆筑纯净的黄土成为墙体(图三)。目前解剖的几个地点,普遍发现紧贴城墙分布的河道,应为外城河。

从比较完整的城墙剖面观察,在墙体的内外侧坡面上普遍发现数层倾斜堆积,含有较多陶片和其他有机物,地层的颜色呈灰黑色,并从坡面蔓延到内外城河近墙一侧的河岸之上(图四)。这种地层的土质普遍松软,富含各类有机质和较多的陶片,葡萄畈等地的一些地层里还发现较多的块状红烧土。

古城城墙截面呈梯形,在保存状况较好的位置观察,城墙内外两侧的坡度很缓。以北墙解剖点(北 TG2)为例,其外侧坡角约 20 多度。因南方地区的雨水较大,人工垒筑的墙土又缺乏直立性,所以不能形成较为陡峻的边坡。遗址在本区域东苕溪两岸的河堤也同为土质坝,为防止崩塌,一般技术要求背水侧的坡比(坡的垂直高度与坡的宽度之比)为 1:2 左右,即其坡度约为 27 度弱(图五)。这种坡度的选择显然是经过长期工程实践结果,因此推测同为土质结构的良渚城



图四 城墙外侧剖面

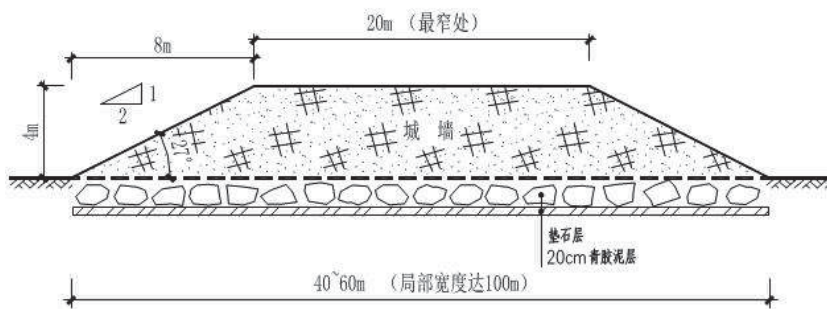


图五 城墙外侧坡度实景图

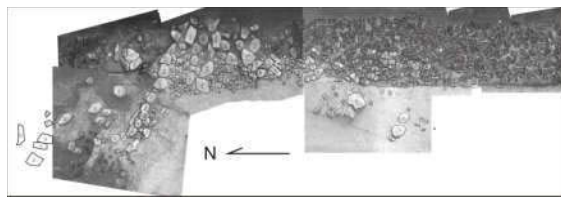
墙的内外侧坡度与之类似。

根据现场勘察情况,绘制出典型城墙结构剖面示意图(图六):城墙底宽度约 40~60 米,顶部最窄处为 20 米,城墙剖面坡角大约为 27°,城墙高度与坡角投影长度的比值大约为 1:2 关系。城墙底部为铺垫石,铺垫石为较均匀的 1~2 层块石,块石长径主要分布在 10~35 厘米,少数大于 40 厘米和小于 10 厘米,探沟显示垫石具有边部块石尺寸较大,中部部分块石较小的特点。铺垫石下为一层 20 厘米左右的青胶泥层。

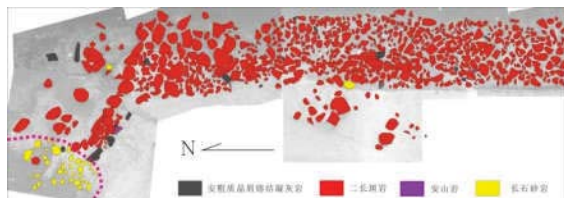
以北城墙考古探沟为例说明垫石分布情况,北墙探沟位于瓶窑镇大观山村雉山组的乌兜兜地点,处于北墙中部偏东位置,探方面积 16×2.5,共 40 平方米,因南部留有台阶等未清理到底,暴露的垫石面



图六 城墙剖面示意图



图七 北墙“铺底垫石”分布情况



图八 北墙“铺底垫石”的岩性不均匀分布现象

积共 25.6 平方米(图七)。“铺底垫石”的岩类分布是杂乱的、随机的,而有的则有不均匀堆放的现象,即具有分垄现象,如北墙“铺底垫石”的主体为二长斑岩,而在其西北角聚集一小堆长石砂岩(图八)。前期考古研究认为不同岩性的分垄现象表明石料来自不同的采集地点,每一垄内又往往可以根据石块大小和形状等明显的差异进一步划分为小堆,这一小堆可能就是当时运输工具一次的运载量,表明当时的石料一经运到就进行铺装堆放,而未经过统一备料的过程^②。

2、“铺底垫石”作用

良渚古城遗址位于太湖流域,良渚时期该流域处于江河湖海的交汇处,地形地貌类型复杂,大部分地区地势低洼,河流密布水量丰富,地质环境以淤泥、沼泽为主的软质地基。人类活动的原始地面含水量高,在湿土上夯筑高台可以减少水对人类生活的不利影响,因此堆筑高台应该是良渚时期重要的大规模群体性建设行为。

在湿地上筑高土台,就要解决堆筑黄土过程中遇到各类问题。良渚古城的原始地面为沼泽地区,以淤泥质土为主,淤泥土是在静水或水流缓慢的沉积环境下形成,在现代工程上认为其具有天然含水率

高、压缩性大、承载能力低等特点,工程描述为软塑到流塑状态的黏性土,其沉积厚度不同,因有机物含量差异,会造成力学性能极不稳定。在现代工程理论中,这样的地基被认为是软弱持力土层,在工程建设中基础位于软弱土层时,需避免直接作为地基使用,或者通过

地基处理进行加固后使用。直接在淤泥土上面施加荷载因其易变形且不均匀、触变形及流变性大,也就是说直接在淤泥土上夯筑黄土,会遇到地基破坏、夯实效果差等问题,很难实现堆筑高台的目标,因此必须通过工艺手段去满足夯筑黄土条件,

在生土面上铺设胶泥层相当于为上部营建工程做一道垫层,现代工程中在地基和构筑物间都会设置垫层,其目的是当地基表面凸凹不平时,通过垫层的填补、堆高为施工提供平整施工面,便于下一步开展工作。可以想象良渚时期的生土面不会很平整,通过管理手段人工采制的胶泥在工程性质上具有良好的一致性,其强度和稳定性高于淤泥,通俗的讲就是在烂泥塘上铺一层软垫,改善生土不均匀性导致地基层差异大的情况,可以提高局部软弱地基的强度,为下一步抛石过程中,均衡石块沉降量,减少软弱地基引起石材浪费。胶泥还可以隔离草茎、树根等杂物,这些植物混杂在夯土中会形成储水空间影响夯土效果。

垫层完成后,开始铺设垫石,垫石间填充土质,因块石影响,这部分土质没有明显的夯筑痕迹,试验数据也显示该土具有高压缩性,属于自然填筑完成,形成城墙下重要的垫石层,垫石层在工程学上具有多重功效。

2.1 “铺底垫石”层具有抛石挤淤加固地基作用

淤泥土的地基承载力大约为 30~60kPa,折合为 2~4 米高土台的自身重量,低于良渚古城墙已知的高度。如果在含水量高、孔隙比大、透水性弱、抗剪强度低的淤泥表面铺垫块石,块石由于自身重力的影响,会挤入淤泥,使淤泥土体结构产生变化,土颗粒重新调整,孔隙水通过块石排出,孔隙压力逐步消散,使这层淤泥的结构和性质得到改善,而石块的挤入等于置换软土材料,提高地承载力,形成块石地基层。这在现代工程中称为“抛石挤淤”地基处理方法,适用于淤泥类表层处理,施工方便,处理效果明显。与现代工程要求相比,良渚古城墙下的垫石层厚度偏薄,地基承载力提高量有限。如果将良渚城墙块石铺底部分作为城墙的基础,其宽度在 40 米以上,满足基础宽度对地基承载力提高的条件,与原始淤泥土相比,承载力至少可以提高约 10%~20%。

按照现代地基计算方法,确定城墙底部荷载情况:

(1) 城墙高度取 4.0m,城墙土容重 γ 取值 16kN/m³,土台自重约为: $q_1=\gamma H=16\times 4=64\text{kN/m}^2$ 。

(2) 城墙上的附加活荷载 q_2 包括古人居住的房屋荷载、房屋内外堆积物荷载以及古人活动的活荷

载等,则:

古人居住的房屋荷载: $2\times 0.2\times 8=3.2\text{kN/m}^2$ (按两层木结构)

堆积物荷载或古人活动活荷载: $2\times 3.0=6.0\text{kN/m}^2$

活荷载合计: $q_2=9.2\text{kN/m}^2$

城墙地基处的总荷载 q_0 等于城墙自重荷载 q_1 与城墙上附加荷载传至地基附加荷载 q_2 之和,则: $q_0=q_1+q_2=64+9.2=70.2\text{kN/m}^2$,取 90kN/m^2 ,那就需要“铺底垫石”范围的地基承载力至少要大于该使用需求值 90kPa。

2016 年 1 月在良渚古城墙的北城墙探沟内进行土样采集工作,采集垫石下土样 3 组,土样编号分别为 CQDJ-N01、CQDJ-N02、CQDJ-N03,土样为良渚文化时期淤泥质土样,分别进行抗剪强度试验和力学指标计算。

根据《建筑地基基础设计规范》GB50007-2011 第 5.2.5 条当偏心距 e 小于或等于 0.033 倍基础底

2.1.1 北城墙土样编号: CQDJ-N01				
仪器号: 03990 量力环系数: $K=1.587\text{ kPa}/0.01\text{mm}$				
垂直压力 /kPa		50	100	200
初读数 $R/0.01\text{mm}$	(1)	0	0	0
最大读数 $R_m/0.01\text{mm}$	(2)	30	58	96
测力环变形 /0.01mm	(3)=(2)-(1)	30	58	96
抗剪强度 /kPa	(4)=(3) $\times K$	47.61	92.05	152.35
$c=17.46\text{kPa} \quad \varphi=34^\circ$				

2.1.2 北城墙土样编号: CQDJ-N02				
仪器号: 03754 量力环系数: $K=1.590\text{ kPa}/0.01\text{mm}$				
垂直压力 /kPa		50	100	200
初读数 $R/0.01\text{mm}$	(1)	0	0	0
最大读数 $R_m/0.01\text{mm}$	(2)	27	28	31
测力环变形 /0.01mm	(3)=(2)-(1)	27	28	31
抗剪强度/kPa	(4)=(3) $\times K$	42.93	44.52	49.29
$c=40.54\text{kPa} \quad \varphi=2^\circ$				

2.1.3 北城墙土样编号: CQDJ-N03				
仪器号: 03990 量力环系数: $K=1.587\text{ kPa}/0.01\text{mm}$				
垂直压力/kPa	(1)	50	100	200
初读数 $R/0.01\text{mm}$	(2)	0	0	0
最大读数 $R_m/0.01\text{mm}$		8	9	10
测力环变形 $/0.01\text{mm}$	(3)=(2)-(1)	8	9	10
抗剪强度/kPa	(4)=(3)×K	12.70	14.28	15.87
$c=11.91\text{kPa} \quad \Phi=1^\circ$				

面宽度时, 根据土的抗剪强度指标确定地基承载力特征值可按式计算:

$$f_c = M_b \gamma b + M_d \gamma_m d + M_c c_k \quad (\text{式 } _1)$$

式中:

f_c ——由土的抗剪强度指标确定的地基承载力特征值;

M_b, M_d, M_c ——承载力系数;

b ——基础底面宽度, 大于 6m 时按 6m 取值, 对于砂土小于 3m 时按 3m 取值;

c_k ——基底下一倍短边宽度内土的粘聚力标准值。

参考土力学公式, 计算可得城墙下地基承载力标准值为 133kPa, 满足上部荷载使用要求, 具体计算参数如下:

地基承载力计算									
c_k	Φ_k	M_b	M_d	M_c	γ	γ_m	b	d	f_a
23.3	12.3	0.24	1.98	4.6	18	11	6	0	133.1

2.2 “铺底垫石”层为上部施工平台

良渚古城的垫石层是由块石和分布期间的填土组成, 通过现场观察, 这部分填土夯筑度不高, 下部以原状土或胶泥土为主, 上部以夯筑黄土为主。块石间土质密实度与自然土情况接近, 因为块石和水环境存在, 需要花费大量人工进行细致夯筑, 才可能达到夯筑效果, 实际情况显示良渚古人并未进行石块间夯筑。

根据现代工程力学原理, 土体在竖向压力作用下, 高度会降低, 为保持体积不变, 必然会向四周扩散, 如果在对土体施加竖向压力的同时, 采取措施阻止土体的水平向变形, 这时土体体积受到限制, 土体能够承担的竖向压力也会提高, 这就是三向受压承

载能力提高的原理。块石对于回填土就形成周围的约束, 限制回填土向侧面扩散, 在竖向压力作用下沉降变形小, 使回填土层具有一定的承载力和稳定性, 也就为上部夯土层提供稳定的施工作业平台。当上部夯土层形成后, 这部分回填土就被封闭在上部夯土、块石、下部地基形成的空间里, 可变形量小, 力学性能长期保持稳定。

2.3 “铺底垫石”层避免夯土出现“橡皮土”情况

人类一般会采取夯实或压实的方法来达到改善力学性能, 人工压实的填土, 其最终沉降量由瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降组成。瞬时沉降是指外荷载施加后立即发生的沉降; 固结沉降是指土体中超孔隙水压力逐渐消散, 孔隙水逐渐排出, 土体逐渐压缩引起的压缩; 次固结沉降是指由于土体的蠕变引起的沉降。这三者的沉降并没有明确界限区分, 在时间上很难区分, 不同土体各类沉降差异很大, 对于饱和粘性土, 固结速度很慢, 有的需要几年甚至几十年才能完成固结。因此为了提高土的强度, 减少压缩性和渗透性, 增加土的密实度, 经常采用夯打、振动和碾压等方法将土压实, 从而保证土体和上部建筑的稳定。压实就是指土体在压实能量作用下, 土颗粒克服粒间阻力, 产生位移, 土颗粒重新排列, 土中孔隙减少, 密实度增加, 达到土体加固效果。

压实过程中必须控制土的含水率, 含水率过高或过低都不利于压实, 含水率过低, 填土遇水后容易引起湿陷; 含水率过高, 会恶化土体力学性质, 达不到压实目的。“橡皮土”是压实过程中很容易出现的

破坏现象, 工程上的解释是因土的实际含水率高于压实的最优含水率, 排水通道不畅或者是有水不断注入, 在反复的外压力作用下, 原状土被扰动, 颗粒之间的毛细孔遭到破坏, 水分不易渗透和散发, 封闭在土体中, 内部土的颗粒将会由固体状态变为塑性状态, 可以理解为土体由硬变软的过程, 日常生活中, 干燥坚硬的土块浇水后变成稀泥, 这种土在外力作用下容易改变原有形状, 如果进行夯打振动等人工活动, 不仅夯不实, 反而会破坏土的天然结构, 强度也将迅速下降。沼泽地水量充裕可以随时提供水分, 这时的夯击就像揉面团一样, 使土层产生弹性颤动, 并且越夯击, 颤动现象越严重, 结构越不稳定, 不能达到夯实压密提高强度的目的。“橡皮土”主要出

现在粘性土、亚粘性土的压实过程中,良渚城墙所用黄土属于粘性土。出现“橡皮土”后,内部土层在外力作用下呈明显橡皮状的弹性晃动,进一步夯压不能产生压实效果,而且越夯越软,夯压能量大部分损失在侧向变形中,对内部传递挤密效果很小,承载力提高不明显甚至下降,在“橡皮土”上施加荷载,变形量大,容易引起不均匀沉降,失去对上部结构的支承作用,不能作为工程的基础使用。

如果没有块石铺底,而直接在淤泥表面夯筑黄土,夯筑时的振动会使淤泥的土质结构遭到扰动,颗粒之间的毛细孔结构遭到破坏,水分不易透出和散发,而上部铺垫的黄土经夯实,形成硬壳覆盖在淤泥表面,这将进一步阻止了水分的渗透,使淤泥形成软塑或者流塑状态的橡皮土质。一旦形成橡皮土,将不能进一步夯实,并且越夯越软,受夯位置下陷,四周隆起,而且这种现象越夯越严重。

基于上述原因,在夯土前必须做场地预处理,现代工程中一般会进行换填、预铺垫层,即在软弱土上部,预铺一定厚度的垫层材料,如碎石块、建筑废料、矿渣等。良渚古城城墙下的“铺底垫石”就起到预处理的作用,将夯土层与良渚时期沼泽地在高度上隔离出一段距离,减少水环境影响。

2.4 “铺底垫石”层具有软土地基排水固结层作用

饱和软土尤其是淤泥或淤泥质土的含水量高,渗透系数和不排水抗剪强度均较低。在集中向软土表面大量堆载的短时间内,饱和土体中的孔隙水还未及时排出,土体孔隙体积没有发生改变,全部压力的增量完全由孔隙水来承担,地基土颗粒间的压力即有效压力并没有发生变化,也可以理解为外部施加的压力是由水承担而不是土在承担,这就造成受压性能取决于水的含量及变化。在饱和水情况下,地基土的抗剪强度在一定的时间内往往没有提高,还会因堆载施工的扰动造成水流动而下降。当填筑体在地基中所产生的应力达到土的不排水强度时,土体将产生整体剪切破坏,土体中将产生连续滑动面,填筑体下的淤泥被强制挤向两侧,向上翻涌和隆起。

在现代工程中遇到淤泥土地基时,必须进行加固处理,土力学

中称之为排水固结,排水固结过程实质就是不断降低土颗粒间孔隙水压力,逐步提高土颗粒间有效应力的过程。在处理过程中,解决大部分地基沉降,加速地基土的抗剪强度的增长,从而提高地基的承载力和稳定性,减少后期使用中的沉降量,有利于控制沉降差。

排水固结法是由排水系统和加压系统两部分组合而成。如果将良渚古城城墙系统看做对软土地基进行堆载法固结处理,其中城墙土体重量是堆载加压系统,而城墙下垫石层就是排水系统,也可以认为是水平排水盲沟,因为淤泥土周边都是水环境,垫层部位就是重要的排水通道。块石相比粘土、淤泥土,其渗水性能高,一般认为砾石渗透系数是粘土的1000倍以上。城墙下的淤泥土在城墙压重下及垫石排水作用下,随时间延长土体中的水被慢慢压出,城墙施加的压力逐步转换为土颗粒承担,地基承载力和稳定性不断提高,保证上部城墙长期使用(图九)。



图九 “铺底垫石”排水作用

对前述北城墙探沟内三组土样进行压缩试验和计算分析:

2.4.1 北城墙土样编号: CQDJ-N01					
试验前密度 ρ_0 : 1.819 试验前含水率 ω_0 : 0.287					
土粒比重 G_s : 2.73 试验前孔隙比 e_0 : 0.931					
垂直压力 (MPa)	总变形量 (mm)	压缩后试样高度 (mm)	孔隙比	压缩系数 (MPa ⁻¹)	压缩模量 (Mpa)
P_i	$\Sigma \Delta h_i$	$h = h_0 - \Sigma \Delta h_i$	$e_i = e_0 - \frac{1 + e_0}{h_0} \cdot \Sigma \Delta h_i$	$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}$	$E_s = \frac{1 + e_i}{a_v}$
0		20	0.931		
0.05	2.028	17.972	0.735	3.92	0.501
0.1	2.717	17.283	0.669	1.33	1.476
0.2	3.633	16.367	0.58	0.884	2.221
0.4	4.492	15.508	0.497	0.415	4.736
试验成果分析: $a_{1-2}=0.884\text{MPa}^{-1}$ $E_{s1-2}=2.221\text{MPa}$ 该土样为高压缩性土。					

2.4.2 北城墙土样编号: CQDJ-N02

试验前密度 ρ_0 : 1.380 试验前含水率 ω_0 : 0.493
土粒比重 G_s : 2.65 试验前孔隙比 e_0 : 1.886

垂直压力 (MPa)	总变形量 (mm)	压缩后试样高度 (mm)	孔隙比	压缩系数 (MPa ⁻¹)	压缩模量 (Mpa)
P_i	$\Sigma \Delta h_i$	$h = h_0 - \Sigma \Delta h_i$	$e_i = e_0 - \frac{1 + e_0}{h_0} \cdot \Sigma \Delta h_i$	$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}$	$E_s = \frac{1 + e_i}{a_v}$
0		20	1.866		
0.05	2.581	17.419	1.496	7.402	0.265
0.1	3.122	16.878	1.419	1.551	1.267
0.2	3.466	16.534	1.369	0.493	3.984
0.4	3.96	16.04	1.299	0.354	5.549
"试验成果分析: $a_{1-2}=0.493 \text{ MPa}^{-1}$ $E_{s1-2}=3.984 \text{ MPa}$ 该土样为中压缩性土"					

2.4.3 北城墙土样编号: CQDJ-N03

试验前密度 ρ_0 : 1.651 试验前含水率 ω_0 : 0.542
土粒比重 G_s : 2.67 试验前孔隙比 e_0 : 1.494

垂直压力 (MPa)	总变形量 (mm)	压缩后试样高度 (mm)	孔隙比	压缩系数 (MPa ⁻¹)	压缩模量 (Mpa)
P_i	$\Sigma \Delta h_i$	$h = h_0 - \Sigma \Delta h_i$	$e_i = e_0 - \frac{1 + e_0}{h_0} \cdot \Sigma \Delta h_i$	$a_v = \frac{e_i - e_{i+1}}{p_{i+1} - p_i}$	$E_s = \frac{1 + e_i}{a_v}$
0		20	1.494		
0.05	1.247	18.753	1.338	3.111	0.631
0.1	1.873	18.127	1.26	1.561	1.258
0.2	2.637	17.363	1.165	0.953	2.061
0.4	3.57	16.43	1.049	0.582	3.376
"试验成果分析: $a_{1-2}=0.953 \text{ MPa}^{-1}$ $E_{s1-2}=2.061 \text{ MPa}$ 该土样为高压压缩性土"					

城墙主体自重即地基土上附加应力 $p_0=90\text{kPa}$, 根据试验结果可以求出北城墙地基土压缩模量平均值 $E=2.755\text{MPa}$ 。地基沉降假定地基土均为淤泥质

土,厚度暂且按 20 米(取值偏大)计算。地基沉降计算采用分层总和法的规范推荐方法进行,过程见地基沉降计算表。

根据现代工程经验,实际沉降量一般会低于计算值,可以认为良渚古城城墙在建成后地基下沉约 500 毫米,良渚古人“铺底垫石”的标高可能比现在发现遗址的实际位置高 0.5 米左右。

2.5 垫石基础层具有保持上部城墙稳定性作用

良渚古城城墙土是夯实土,经过夯实的土压缩变形和湿化后变形小,土体的稳定性高;土中孔隙率减少,土的渗透能力减少,抗雨水侵蚀能力强。但是良渚时期夯土的夯实度并不高,通过现场取样进行土力学试验分析,城墙土仍属于中~高压压缩性土,这可能有三个原因,一是良渚古人夯筑工具限制夯筑效率低;二是当时对夯土效果认知有限导致夯筑标准低;三是良渚时期水环境影响限制夯实效果。从莫角山土台发掘情况看,良渚时期夯土的密实度、强度达不到后来中国古代对夯土定义的标准,只能说对堆土进行夯筑工作,改善土的力学性质。

人工堆高土台修筑城墙,就有边坡稳定性问题,一般会出现滑坡现象,是指斜坡上的不稳定土体在重力作用下沿一定的滑动面开始滑动的现象,一般出现在边坡角度在 20~40 度时(图一〇)。

滑坡的原因有很多种因素,最主要的是原因有降雨、地下水变化,这在良渚时期是实际存在的自然因素,降雨会产生渗透水进入土体孔隙,使土体的抗剪强度降低,当土中含水量越高,形成滑坡趋势的可能性增大,而且水在土中有滞后效应,在不能有效排出的情况

下,将多次降雨形成的渗透水聚集在土中,在连续暴雨冲击下以诱发滑坡产生,而下部水位抬升也会提

地基沉降计算

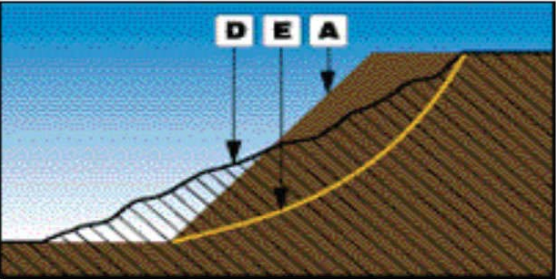
1.计算公式

《建筑地基基础设计规范》(GB5007-2011)5.3.5

$$s=\psi_s\sum P_0(z_i\alpha_{i-z_{i-1}}\alpha_{i-1})/E_{si}$$

土层的物理力学参数

土层号	土层名称	土层厚度(m)	ψ_s	沉降计算经验系数	z_i	基础底面至第 <i>i</i> 层土的距离m			
1	淤泥层	20	P_0	附加压力kPa	E_{si}	第 <i>i</i> 层土的压缩模量Mpa			
2	淤泥层	1	α_i	平均附加应力系数	s	地基最终变形量mm			
b=		40	地基沉降计算表			计算位置：北城墙			
土层号	z/b	ψ_s	P_0	α_i	z_i	α_{i-1}	z_{i-1}	E_{si}	Δs_i
1	0.5	1.083	82	0.239	20			2.755	616.32
2	0.525	1.083	82	0.238	21	0.239	20	2.755	28.108
$s=\sum \Delta s_i$									644.43



A:原斜坡剖面; D:滑坡后的剖面; E:滑动面

图一〇 滑坡现象

2.5.1 北城墙土样编号: CQZT-N01				
仪器号: 03754 量力环系数: K= 1.590 kPa/0.01mm				
垂直压力 /kPa		50	100	200
初读数 R/0.01mm	(1)	0	0	0
最大读数 R _m /0.01mm	(2)	21	47	57
测力环变形 /0.01mm	(3)=(2)-(1)	21	47	57
抗剪强度 /kPa	(4)=(3)×K	33.39	74.59	90.46
c=25.45kPa Φ=19°				

高土中含水率。

如果良渚古城墙直接落在原生土上, 淤泥土或黏土渗透系数较低, 城墙土中水下渗到地面后水平排水速度很慢, 而垫石层渗透性好, 则为上部夯土提供快速水平排水通道, 也就降低出现滑坡的可能性。

由于该排水通道存在, 还可以缓解城墙两侧水位出现高差的不利影响。因降雨积水可能造成城墙两侧水位在短时间内不一样高, 水压就会对城墙产

2.5.2 北城墙土样编号: CQZT-N02				
仪器号: 03754 量力环系数: K= 1.590 kPa/0.01mm				
垂直压力 /kPa		50	100	200
初读数 R/0.01mm	(1)	0	0	0
最大读数 R _m /0.01mm	(2)	11	41	52
测力环变形 /0.01mm	(3)=(2)-(1)	11	41	52
抗剪强度 /kPa	(4)=(3)×K	17.49	65.19	82.68
c=8.75kPa Φ=20°				

2.5.3 北城墙土样编号: CQZT-N03				
仪器号: 03990 量力环系数: K= 1.587 kPa/0.01mm				
垂直压力 /kPa		50	100	200
初读数 R/0.01mm	(1)	0	0	0
最大读数 R _m /0.01mm	(2)	18	40	55
测力环变形 /0.01mm	(3)=(2)-(1)	18	40	55
抗剪强度 /kPa	(4)=(3)×K	28.57	63.48	87.29
c=16.67kPa Φ=20°				

生水平推力, 类似拦水土坝效果, 这对城墙稳定性是不利因素, 但是有垫石基础层存在, 在一定程度上可以起到联通水道作用, 消除不同水位对城墙的影响。

2016 年 1 月在良渚古城墙的北城墙和西城墙探沟内采集城墙土样各 3 组, 土样编号分别为 CQZT-

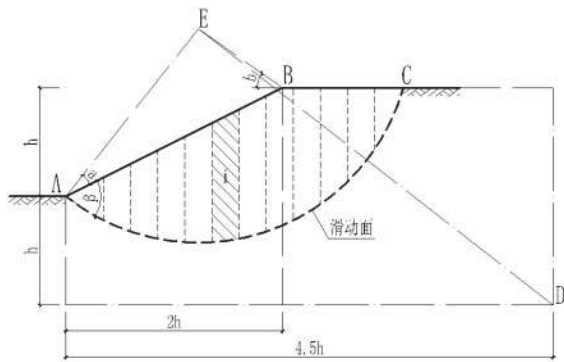
2.5.4 西城墙土样编号: CQZT-W01				
仪器号: 03990 量力环系数: $K=1.587 \text{ kPa}/0.01\text{mm}$				
垂直压力 /kPa		50	100	200
初读数 $R/0.01\text{mm}$	(1)	0	0	0
最大读数 $R_m/0.01\text{mm}$	(2)	14	68	85
测力环变形 /0.01mm	(3)=(2)-(1)	14	68	85
抗剪强度 /kPa	(4)=(3) $\times K$	22.22	107.92	134.90
$c=83.73\text{kPa} \quad \varphi=34^\circ$				

2.5.5 西城墙土样编号: CQZT-W02				
仪器号: 03754 量力环系数: $K=1.590 \text{ kPa}/0.01\text{mm}$				
垂直压力 /kPa		50	100	200
初读数 $R/0.01\text{mm}$	(1)	0	0	0
最大读数 $R_m/0.01\text{mm}$	(2)	25	51	77
测力环变形 /0.01mm	(3)=(2)-(1)	25	51	77
抗剪强度 /kPa	(4)=(3) $\times K$	39.75	81.09	122.43
$c=19.08\text{kPa} \quad \varphi=28^\circ$				

2.5.6 西城墙土样编号: CQZT-W03				
仪器号: 03755 量力环系数: $K=1.605 \text{ kPa}/0.01\text{mm}$				
垂直压力 /kPa		50	100	200
初读数 $R/0.01\text{mm}$	(1)	0	0	0
最大读数 $R_m/0.01\text{mm}$	(2)	18	45	68
测力环变形 /0.01mm	(3)=(2)-(1)	8	45	68
抗剪强度 /kPa	(4)=(3) $\times K$	28.89	72.23	109.14
$c=10.44\text{kPa} \quad \varphi=27^\circ$				

N01、CQZT-N02、CQZT-N03 和 CQZT-W01、CQZT-W02、CQZT-W03, 土样为良渚文化时期黄土土样, 分别进行抗剪强度试验和力学指标计算。

粘性土坡稳定性分析的方法有多种, 这里只介绍瑞典条分法。瑞典条分法是瑞典工程师费兰纽斯 1922 年提出来的, 其基本原理是: 假定土坡沿着圆滑面滑动, 将圆弧滑动体分成若干竖直的土条, 计算各



良渚城墙边坡稳定性计算简图

土条力系对圆弧圆心的抗滑动力矩与滑动力矩, 由抗滑力矩与滑动力矩之比 (稳定安全系数) 来判别土坡的稳定性。根据瑞典条分法假定滑动面, 绘制良渚古城墙计算条分图, 计算过程见附表。

根据现代工程经验, 边坡稳定性系数应大于 1.05~1.50, 根据遗址土样实验结果计算良渚古城北城墙和西城墙边坡稳定性系数均大于经验值, 城墙边坡的稳定性良好。

3、总结

综合上面论述, 良渚古城墙下设置“铺底垫石”基础层有很多实际功效, 使城墙遗址经过几千年风雨仍保持建成时形态, 与现代工程相比也具有参考和借鉴的价值, 证明良渚古人已经掌握地基处理施工经验, 并作为施工标准应用于大规模生产中。但考虑遗址中垫石铺设深度、平面范围、垫石材料规格、夯土质量和当时的可能情况, 笔者认为该工艺的出现, 主要是良渚古人为解决在沼泽地上如何夯筑黄土、不出现“橡皮土”等施工问题, 提高劳动生产效率采取的经验手段。其它效果如提高淤泥土地基承载力和稳定性、保持城墙稳定等功效则是“铺底垫石”基础层带来的实际效果, 不一定为当时良渚古人了解和掌握, 这些经验是人类在几千年工程实践后, 不断进行研究和改进, 特别是近代岩土工程学发展后, 才由经验逐步转变成量化的工程理论。

注释:

① 王宁远、王国平:《从村居到王城》, 杭州出版社, 2013 年。

② 吕青、董传万:《浙江良渚古城墙铺底垫石的特征与石源分析》,《华夏考古》2015 第 2 期。

良渚城墙主体边坡稳定性计算（北城墙）											
角度	上底	下底	高	Gi	$\sin\beta_i$	$\cos\beta_i$	$G_i\sin\beta_i$	$G_i\cos\beta_i$	$\tan\Phi G_i\cos\beta_i$	Li	CiLi
-28.00	0.00	1.58	1.40	18.80	-0.47	0.88	-8.82	16.60	5.71	1.66	28.22
-19.00	1.58	2.50	1.00	34.68	-0.33	0.95	-11.29	32.79	11.29	1.08	18.39
-12.00	2.50	3.26	1.00	48.96	-0.21	0.98	-10.17	47.89	16.48	1.03	17.51
-5.00	3.26	3.89	1.00	60.78	-0.09	1.00	-5.29	60.54	20.84	1.01	17.17
0.00	3.89	4.39	1.00	70.38	0.00	1.00	0.00	70.38	24.22	1.00	17.00
5.00	4.39	4.76	1.00	77.78	0.09	1.00	6.78	77.48	26.66	1.01	17.17
13.00	4.76	5.00	1.00	82.96	0.22	0.97	18.65	80.84	27.82	1.03	17.51
20.00	5.00	4.89	1.00	84.07	0.34	0.94	28.74	79.00	27.19	1.08	18.36
28.00	4.89	4.30	1.00	78.12	0.47	0.88	36.66	68.98	23.74	1.16	19.72
36.00	4.30	3.47	1.00	66.05	0.59	0.81	38.80	53.44	18.39	1.30	22.10
46.00	3.47	2.28	1.00	48.88	0.72	0.69	35.14	33.97	11.69	1.55	26.40
57.00	2.28	0.00	1.10	21.32	0.84	0.55	17.87	11.62	4.00	2.52	42.84
							147.06		218.02		262.40
边坡稳定性系数 K=										3.27	

良渚城墙主体边坡稳定性计算（西城墙）											
角度	上底	下底	高	Gi	$\sin\beta_i$	$\cos\beta_i$	$G_i\sin\beta_i$	$G_i\cos\beta_i$	$\tan\Phi G_i\cos\beta_i$	Li	CiLi
-28.00	0.00	1.58	1.40	18.80	-0.47	0.88	-8.82	16.60	9.45	1.66	62.67
-19.00	1.58	2.50	1.00	34.68	-0.33	0.95	-11.29	32.79	18.67	1.08	40.85
-12.00	2.50	3.26	1.00	48.96	-0.21	0.98	-10.17	47.89	27.27	1.03	38.88
-5.00	3.26	3.89	1.00	60.78	-0.09	1.00	-5.29	60.54	34.47	1.01	38.13
0.00	3.89	4.39	1.00	70.38	0.00	1.00	0.00	70.38	40.07	1.00	37.75
5.00	4.39	4.76	1.00	77.78	0.09	1.00	6.78	77.48	44.11	1.01	38.13
13.00	4.76	5.00	1.00	82.96	0.22	0.97	18.65	80.84	46.02	1.03	38.88
20.00	5.00	4.89	1.00	84.07	0.34	0.94	28.74	79.00	44.98	1.08	40.77
28.00	4.89	4.30	1.00	78.12	0.47	0.88	36.66	68.98	39.27	1.16	43.79
36.00	4.30	3.47	1.00	66.05	0.59	0.81	38.80	53.44	30.43	1.30	49.08
46.00	3.47	2.28	1.00	48.88	0.72	0.69	35.14	33.97	19.34	1.55	58.63
57.00	2.28	0.00	1.10	21.32	0.84	0.55	17.87	11.62	6.62	2.52	95.13
							147.06		360.70		582.67
边坡稳定性系数 K=										6.41	

③刘斌：《杭州市余杭区良渚古城遗址 2006~2007 年的发掘》，《考古》2008 年第 7 期。

④董建国等：《土力学与地基基础》，同济大学出版社，2005 年。

⑤赵明华：《土力学与基础工程》，武汉工业大学出版社，2000 年。

⑥岗元著、罗汀、姚仰平等编译：《土力学》，中国水利水电出版社，2011 年。

⑦叶观宝、高彦斌等：《地基处理》，中国建筑工业出版社，2009 年。

⑧孙更生、郑大同等：《软土地基与地下工程》，中国建筑工业出版社，1984 年。

⑨折学森：《软土地基沉降计算》，人民交通出版社，1998 年。

⑩郑俊杰：《地基处理技术》，华中科技大学出版社，2009 年。

⑪赵维柄、施建勇等：《地基处理与基础工程》，中国水利水电出版社，2000 年。

⑫《JGJ79-2012 建筑地基处理技术规范》，中国建筑工业出版社，2013 年。

⑬《SL274-2001 碾压式土石坝设计规范》，中国水利水电出版社，2002 年。