

紫禁城城墙现状调查与保护初探

A Survey of Current Status of the Walls of the Forbidden City and a Preliminary Exploration of Its Preservation

曹晓丽 李德山 刘卫华

Cao Xiaoli Li Deshan Liu Weihua

内容提要：

紫禁城城墙是我国现存规模最大、保存最完整的皇家宫殿城墙，蕴涵着丰富的历史、文化、军事信息，具有重要的考古、科学价值。本文结合历史文献，应用现代勘察物探技术，分析了城墙内夯土物理力学性质，并测定了夯土矿物成分；对城墙的现状作了初步调查，依据病害的不同形式及破损机理进行分类，主要损伤有不均匀沉降、鼓胀变形、裂缝、风化剥落、有害植被、返碱等，同时提出了保护城墙的基本对策及建议。

关键词：

紫禁城城墙 现状调查 损伤 保护

ABSTRACT

The walls of the Forbidden City are the largest and best preserved extant city walls of an imperial palace. They contain rich historical, cultural, and military information, and possess important archaeological and scientific value. By referring to historical literature and modern geophysical prospecting technology, this article analyzes the physics-mechanics properties and determines the mineralogical composition of the rammed earth in the walls. Preliminary surveys of the current status of the walls lead to a classification of the diseases as well as damage mechanisms. The main forms of damage include uneven settlement, dilatation and deformation, fractures, weathering and exfoliation, injurious vegetation, and accumulation of salt. In the meantime, countermeasures and recommendations are proposed for the walls' preservation.

KEY WORDS

Walls of the Forbidden City, status survey, damages, preservation

中国古城墙是古代文明的重要组成部分，它是冷兵器时代的军事防御设施，蕴涵了古代的军事政治制度、生产生活方式、工程技术与材料、城市变迁等信息，是我们民族珍贵的历史文化遗产。紫禁城城墙作为现存最完整的皇家宫殿城墙，经过近六百年的风雨侵蚀，出现了较多病害和险情，如1988年8月西华门以北200m处城墙的墙面发生约100m²的坍塌，给城墙的保护敲响了警钟。为了全面了解城墙现状，为后期保护研究提供可靠依据，“紫禁城城墙保护研究”课题组进行了详细的现场调查。

一 城墙形制构造

紫禁城城墙建成于明永乐十八年（1420年），《万历大明会典》（申时行等编，工部卷一百八十七）详细记录了城墙规制：“紫禁城起午门，历东华、西华、玄武三门，南北各二百三十六丈二尺，东西各三百二丈九尺五寸，城高三丈，垛口四尺五寸五分，基厚二丈五尺，顶收一尺二寸五分。”

实测紫禁城城墙南北长963.13m，东西宽752.54m，地面到顶部高9.27m。断面呈上窄下宽的梯形，墙脚宽为8.55m，顶部宽6.63m，内外两墙面收分约10%。城墙顶部两侧设有0.38m宽的宇墙和垛墙，内侧宇墙高约0.9m，墙帽是瓦脊顶，扣脊瓦为黄琉璃瓦；外侧垛墙高约1.43m，垛墙上筑有品字形垛口，高约0.63m，宇墙与垛墙分别向内侧错开0.06m砌筑〔图一〕。城墙四个方向开有四座城门，城门上建有城台和城楼。午门城台长127.27m，宽36.80m；神武门、西华门、东华门三个城门城台规格相同，均长50.18m，宽26.46m。城墙四个角楼城台为正方形，长、宽均为28.54m。

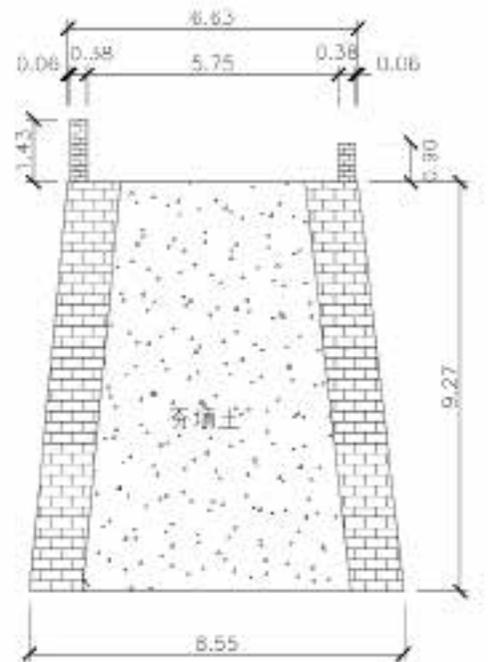
依据一营造尺约为32cm，实测值与《大明会典》比较见表1，经比较可知，最大差值约3%，最小差值0.4%。

表1 实测值与《大明会典》比较表

项目	南北长度	东西长度	城墙高度	垛口高度
《大明会典》	三百二丈九尺五寸	二百三十六丈二尺	三丈	四尺五寸五分
换算值(m)	969.44	755.84	9.6	1.46
实测值(m)	963.13	752.54	9.27	1.43
差值	0.6%	0.4%	3%	2%

二 城墙夯土性质

为了解城墙内部夯土的土质类型、物理性质和松散程度，以便对其采取针对性的保护措施，我们首先采用探地雷达方法确定城墙异常位置和深度，然后根据现场环境条件和地质雷达结果，在异常区域布置轻型动



图一 城墙结构断面示意图

力触探孔, 随后为进一步查明城墙内填土地详细情况, 利用槽探和探井进行详勘。

(一) 样品采集

在人工挖孔形成的圆形探井中, 沿探井侧壁采集样品, 每米取不少于 10 个环刀土样, 另每米取 2 个环刀土样备用, 环刀土样按取土深度和取土次序编号, 取土方位按东、西、南、北四个方向标注。并且每米在井底取 1 个柱状土样, 柱状土样采用“柱”加深度编号。取土完毕后, 进行土的物理性质试验、压缩试验、膨胀试验、渗透试验、湿陷试验、直剪试验、固结不排水 (CU) 三轴试验等。土工试验项目数量统计见表 2。

表2 土工试验项目数量统计表

试验项目名称	试验数量 (个)	试验项目名称	试验数量 (个)
土的物理性质试验	101	湿陷试验	10
颗粒分析	59	膨胀试验	10
压缩试验	60	直剪试验	9
渗透试验	7	三轴试验(CU)	3

(二) 夯土物理力学性质

根据野外探井勘探、原位测试和室内土工试验, 获得各土层的物理力学性质指标见表 3。依据工程特性可将城墙夯土分为两类, 表 3 中①为人工填土层, 沿城墙高度约 8.6m, 是修筑城墙时人工夯填而成; ②为老填土层, 主要分布在城墙基础以下, 为修筑城墙前的填土地层。根据实验数据, 可把城墙地面向下深 10m 的范围内土层分为如下几类。

1. 粉质黏土素填土①

该层土呈褐黄色, 湿度较湿, 可塑性介于可塑到坚硬之间, 含有植物根系、灰渣等杂质, 厚度约 1.3m 至 2.5m。该土层在深 1.3m 处被青砖分成上下两层[图二], 并在 1.9m 处发现直径为 0.3m、长度 1.2m 的孔洞[图三], 这是因为多次维修使得夯土层含水率不同, 经过长期收缩、不均匀下沉, 在渗水作用下形成了墙体内部夯土新旧之间错位、下沉, 最后被冲刷形成孔洞。



图二 1.3m 砖土交界处

2. 粉质黏土素填土①₃

土层呈褐黄色, 湿度较湿, 可塑性介于硬塑到坚硬之间, 含有少量灰渣和有机质土, 厚度 1.65m。在 3.4m 深处发现南侧壁存在连通的双洞, 孔径约 0.2m, 深 0.3m [图四、图五]。这是由于夯土层土质松散, 长期被渗水浸泡导致夯土下陷产生。



图三 1.9m 地面孔洞

3. 粉质黏土夯填土①₄



图四 连通的孔洞



图五 孔洞外观细部形态



图六 夯锤印迹



图七 孔洞内树木残渣

土层呈褐黄色，湿度为较湿—湿，质地坚硬密实，厚度为 1.85m 至 3.25m。本层明显可见分层夯筑时夯锤的锤印〔图六〕，夯印直径约 9 cm，夯土层厚度约为 8cm 至 12cm，与清工部《工程做法》官式夯筑中规定的小夯技术要求一致。在深 8m 处发现走向北偏西的孔洞，南北斜穿探井，直径 0.2m，长度 1.3m，孔洞内壁表面光滑，发现存在树木残渣〔图七〕，推断为修筑城墙时使用木材，原木抽取后所留孔洞。由此印证了宋《营造法式》规定“夜叉木（斜戗），每隔五尺高，横用经木、膊椽（短椽），并用草蔓、木厥缚钉加固”，这种做法是为了加强了城墙墙身的刚度和稳定性。

4. 重粉质黏土夯填土①，

土层呈褐黄色，湿度较湿，质地坚硬，厚度 0.5m 至 1.9m。由于该土层夹于粉质黏土夯填土之中，故包含粉质黏土和有机质土。该土层也能明显地看到夯锤锤印和残留树木残渣的孔洞，可见与上述施工方法一致。

5. 粉质黏土素填土②

该土层主要是城墙的地基老填土层。土层呈褐黄色，湿度较湿，质地介于硬塑到坚硬之间，包含有重粉质黏土、灰渣、有机质土等。本层开挖了 1.6m，没有发现夯锤印记和任何孔洞。

表3 土层物理力学性质指标统计表

土层名称	指标值	w (%)	g (kN/m ³)	S _r (%)	e	I _p	I _L	E _{s100} (MPa)	E _{s200} (MPa)	C (kPa)	Φ (度)
粉质黏土素填土①	平均值	20.2	19.0	76	0.73	13.0	0.18	4.87	5.38	69	21.8
	最大值	26.5	20.7	85	0.84	16.6	0.57	7.92	8.88	71	27.7
	最小值	14.3	16.9	60	0.56	11.0	<0	2.14	3.06	68	15.9
	变异系数				0.10			0.35	0.35		
	指标个数	36	34	34	26	39	34	24	25	2	2
粉质黏土素填土① ₃	平均值	18.2	19.6	77	0.64	12.8	0.06	8.60	9.58	54	26.0
	最大值	23.1	20.5	83	0.79	13.5	0.43	13.81	15.49	73	26.6
	最小值	14.3	18.8	72	0.53	11.5	<0	6.19	7.52	36	25.4
	变异系数				0.10			0.21	0.22		
	指标个数	18	17	17	17	21	17	12	12	2	2
粉质黏土夯填土① ₄	平均值	18.2	20.0	81	0.61	12.7	0.07	9.96	10.63	57	21.3
	最大值	25.5	20.5	98	0.71	14.3	0.57	14.37	15.73		
	最小值	15.4	19.1	75	0.54	10.6	<0	6.83	7.34		
	变异系数				0.08			0.24	0.24		
	指标个数	16	16	16	16	18	16	11	11	1	1
重粉质黏土夯填土① ₅	平均值	18.3	19.8	79	0.63	14.7	0.06	10.85	11.78	79	22.6
	最大值	20.9	20.5	88	0.71	16.3	0.16	16.55	17.66	88	27.0
	最小值	15.5	19.1	74	0.54	13.4	<0	7.11	7.25	70	18.3
	变异系数				0.07			0.29	0.31		
	指标个数	10	10	10	10	14	10	7	7	2	2
粉质黏土素填土②	平均值	17.9	20.1	81	0.60	13.6	0.03	12.57	13.61	72	20.1
	最大值	19.2	20.7	87	0.68	15.6	0.09	16.56	17.14	73	20.8
	最小值	16.9	19.0	70	0.54	12.4	<0	8.46	9.45	71	19.5
	变异系数				0.06			0.18	0.18		
	指标个数	16	16	16	16	20	16	12	12	2	2

表中：w—天然含水量，g—天然重度，S_r—饱和度，e—天然孔隙比，I_p—塑性指数，I_L—液性指数，E_s—压缩模量，c—粘聚力，Φ—内摩擦角。

(三) 城墙软弱松散区测定

根据探井内土层情况、压缩试验结果和轻型动力触探试验经验，确定轻型动力触探试验锤击数大于 10 击/10cm 为较密实区，小于 10 击/10cm 为软弱区，小于 5 击/10cm 为严重松散或孔洞区。现场测试情况见表 4，发现软弱和严重松散区主要分布在城墙地面下 4.5m 之间的土体，推断是由于曾经多次维修采用不同的施工

工艺所致。

表4 轻型动力触探试验显示的软弱和严重松散区

轻型动力触探点号	轻型动力触探深度 (m)	轻型动力触探平均值	区域划分	备注
1	0.00~1.10	3.0	严重松散	0.4~0.9m为虚土或孔洞
	1.70~2.30	5.8	软弱	
	4.00~4.50	5.3	软弱	
2	0.00~1.20	3.5	严重松散	0.4~0.8m为虚土, 1.8~2.7m为孔洞
	1.60~4.30	2.9	严重松散	
3	0.00~0.70	2.3	严重松散	0.2~0.6m为虚土或孔洞
	0.70~1.30	8.0	软弱	
	1.60~2.70	6.3	软弱	
	3.50~3.70	7.5	软弱	
	5.30~5.50	7.5	软弱	

(四) 夯土矿物成分测定

采用电子镜扫描试验分析方法, 选取三个环刀土样进行形貌分析和矿物成分分析。土样成分统计情况见表5。分析显示, 土样主要成分元素为 O、Si、C、Fe、Al, 次要成分元素为 Ca、K、Mg、Na、Ti。通过测定夯土矿物成分表明, 土样主要组成物质为硅氧化物, 其次为铁铝化物, 次要成分元素组成的物质含量低, 土中不包含对环境产生不良影响的元素或矿物。

表5 土样成分统计表

土样编号	24	39	40
元素	重量百分比	重量百分比	重量百分比
O	45.86~48.46	33.54~48.50	42.11~48.07
Si	22.54~24.42	24.02~53.31	22.33~26.82
C	2.77~5.76	4.42~10.65	4.72~8.37
Fe	6.52~7.97	0.57~8.56	6.21~10.02
AL	8.15~9.16	0.49~8.85	7.58~9.78
Ca	2.90~4.09	0~2.88	1.75~3.89
K	2.27~2.82	0~2.62	1.89~2.65
Mg	1.75~2.08	0~1.88	1.27~2.15
Na	0.46~0.76	0~0.44	0.33~0.96
Ti	0.38~0.61	0~0.43	0~0.52

三 城墙损伤现状及原因初探

结合城墙的损伤现状和对其土质的分析测试, 依据残损隐患不同形式及破坏机理, 我们认为紫禁城城墙主要存在如下六种病害。



图八 青白石排水口



图九 地面砖及砖缝侵蚀严重

(一) 城墙顶面不均匀沉降

在建造时古代匠师已充分认识到城墙排水的重要意义,具体表现为城墙顶面横向呈外侧高内侧低走势,排水由外向里,经内侧均匀分布的青白石排水口排出;〔图八〕此外整个城墙纵向呈北高南低的态势,南北相差约1m,这也是为了满足排水需要。但是,由于长期的风雨侵蚀,造成地面慢砖外皮脱落,出现剥蚀、风蚀等损伤,〔图九〕以及砖之间的胶结灰缝流失,导致城墙顶面出现程度不同的渗水现象。另外,由于配合展览等工程需要,部分开挖顶面进行穿管、铺设电缆等施工,也间接影响到地面防水、排水系统,雨水不能及时通畅排出,逐渐渗入墙体,造成顶面不均匀沉降。此次调查显示,城墙顶面慢砖可见多处局部沉陷,沉陷分布无明显的规律性,沉陷量最大处约28cm,最小处约3cm,明显沉降下陷区域共有三处,主要位于北侧城墙神武门东段、东侧城墙东华门北段以及南侧城墙午门西段。

(二) 城墙鼓胀变形

城墙顶面排水不畅也导致雨水、雪水和冻融水长期侵蚀地面砖和砖缝,形成渗水缝隙,逐渐渗透进入内部夯土,造成夯填土凝聚力和摩擦角减小,土的重度增大,导致墙体的侧向挤压压力急剧增大,不断接近城墙外侧砌体的抗压抗剪力,使得城墙发生鼓胀变形,随着压力的增大到墙体极限应变时就会导致墙体开裂甚至坍塌,1988年8月西华门北向200m处城墙的墙面塌落就是惨痛的教训。另一方面,原夯填土夯填不够均匀,局部夯实密度不够,在渗水和自重的影响下,易形成内部渗水通道,以致发生分层不均匀沉降,造成局部回填土下陷松散,同样增大了城墙的侧向压力,致使城墙发生变形损伤。〔图十、十一〕

表6 城墙鼓胀变形

序号	位置	鼓胀变形量
1	西北角楼东3~4m	深度5.2~9m, 鼓胀0.3m
2	西北角楼南265~270m	深度4~6m, 鼓胀0.2m
3	西北角楼南310~312.5m	深度1~3m, 鼓胀0.15m
4	西北角楼南372.5~377.5m	深度2~4m, 鼓胀0.2m
5	西北角楼南450~453.5m	深度2~5m, 鼓胀0.2m
6	西北角楼南497.5~502.5m	深度2~6m, 鼓胀0.2m

[续表6]

序号	位置	鼓胀变形量
7	西北角楼南567.5~572.5m	深度3~7m, 鼓胀0.2m
8	西北角楼南577.5~580m	深度3~6m, 鼓胀0.2m
9	西北角楼南605~612.5m	深度3~6m, 鼓胀0.2m
10	西北角楼南702.5~705m	深度3~7m, 鼓胀0.2m
11	西南角楼北0~6m	深度3~6m, 鼓胀0.2m
12	东南角楼城台东1.5~11.5m	深度1.5~4m, 鼓胀0.2m
13	东南角楼城台北2.5~12.5m	深度0.5~7m, 鼓胀0.25m
14	东南角楼城台西2.5~5m	深度2~4m, 鼓胀0.15m
15	午门东马道东85~96m	深度5~7m, 鼓胀0.25m
16	午门西马道西75~80m	深度2~7m, 鼓胀0.2m
17	午门西马道西180~182.5m	深度2~7m, 鼓胀0.2m
18	西南角楼北0~6m	深度3~6m, 鼓胀0.2m
19	东北角楼南190~202.5m	深度3.2~6.7m, 鼓胀0.3m
20	东北角楼南230~252.5m	深度3.2~5.7m, 鼓胀0.3m
21	东南角楼城台东1.5~11.5m	深度1.5~4m, 鼓胀0.2m
22	东南角楼城台南7.5~17.5m	深度0.5~7m, 鼓胀0.25m
23	东南角楼西3m~5.5m	深度2~4m, 鼓胀0.15m



图十 宇墙变形现状



图十一 城墙鼓胀变形现状

(三) 城墙裂缝

调查发现城墙上存在较多的横向和竖向的温度裂缝以及植被根系扩张裂缝〔图十二〕。经分析认为,这与城墙墙体抗裂措施不足有关。《砌体结构设计规范》(GB50003—2001)规定,伸缩缝最大间距100m,由于紫禁城城墙的规模,最长连续墙体约700m,未设置温度伸缩缝,砖砌体线膨胀系数为 $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$,收缩率为 $-0.1\text{mm}/\text{m}$ 。对于直接暴露在阳光下的墙体,在温度分布不均匀和墙体底部基础约束条件下,由于整个墙面



图十二 城墙墙面根系裂缝



图十三 城墙顶部纵向裂缝



图十四 城墙墙面风化



图十五 城墙墙垛风化剥落

热梯度的缘故，温度的变化造成墙体弯曲和膨胀，导致墙面不平整，中央部位出现不规则裂纹；对于温度变形极大部位，超过墙体极限拉应力，沿墙体纵向使墙体在上部出现垂直裂缝。当雨水随着这些裂纹和裂隙进入夯土，多次冻融循环使裂纹和裂隙不断扩展，对城墙的寿命产生较大影响。

此次调查还发现在西侧城墙顶部距西北角楼 123.5m 处，沿南北方向存在一条贯穿裂缝，裂缝位于城墙中央，长 83.9m，宽 4.8cm，〔图十三〕初步分析是上世纪八十年代城墙险情造成的影响，具体原因将进一步深入探查。

（四）城墙风化与剥落

城墙墙面砖出现风化与剥落现象共有 23 处，尤其是内侧城墙砖面的风化较为严重，主要表现有墙面砖呈粉状和鳞片状剥蚀，个别砖块风化剥落成孔状，部分墙砖之间灰缝丧失，城墙顶面砖磨损断裂较多。〔图十四、十五〕分析认为，出现这些病害主要原因有两个方面：一是城砖的老化，二是胶结材料的老化。由于城砖长期暴露在室外环境中，受大气中酸雨腐蚀、冰冻腐蚀和可溶性盐的结晶作用导致砖本身的剥落、风化和分解。烧结砖含有空隙，具有一定的吸水率，当温度达到零度以下时，经多次冻融循环，砖出现开裂，分



图十六 城墙墙面藤本植物



图十七 城墙上草本植物

层、掉皮、缺棱掉角现象。烧结砖中含有硫酸盐，在一定的潮湿条件下，硫酸盐缓慢地与铝酸三钙（灰浆的一种组成成分）起反应，导致粘结灰缝开裂或剥落。此外，生长在墙体的动植物和微生物，在新陈代谢过程中分泌的各种化合物，主要是具有腐蚀性的酸类物质，也引起城墙的腐蚀破坏。

（五）城墙植被的破坏

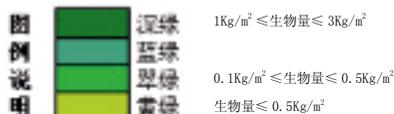
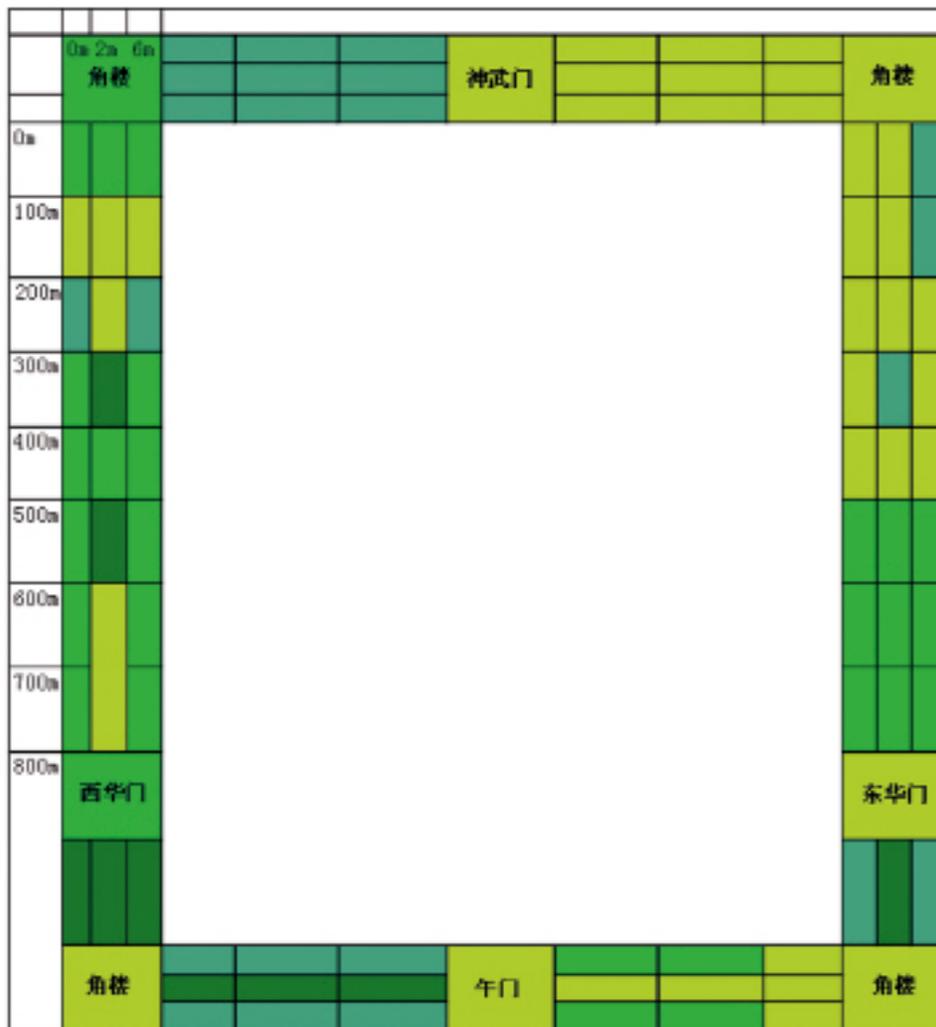
根据调查，城墙上植物种类有 32 个科、60 个属、79 个种。最多的是菊科，其次是十字花科和豆科，禾本科与萝藦科排第三。城墙上的植物分布极不均匀。总体上，无论是植物的种类还是植物的数量，宇墙内侧最少，城墙外侧次之，城墙顶面最多。在城墙顶面，大部分地段靠近宇墙的两侧植物多，中间少。

城墙顶面分布较多的有构树、紫苜蓿、地黄，内侧墙以构树、爬山虎、地黄、酸枣为主，外侧墙植物较少，只存在部分地黄。在这些植被中，以乔木生命力最旺盛，年生长量较大，根系发达，一般主根可达 10m 以上，侧根主要分布于 20 ~ 60cm 土层，对城墙墙体破坏性最大。藤本植物如爬山虎，是深根性植物，主根健壮，水平侧根发达，对墙体破坏性较大。〔图十六〕灌木如酸枣，主根可达 3m 以上，侧根主要分布于 15 ~ 40cm 土层，也对城墙土体形成破坏。草本植物如苜蓿，虽根系较浅，主要分布于 20cm 以上土层，但繁殖能力强，容易导致墙面的损伤。〔图十七〕

通过植物种类调查以及 23 个样方调查数据，得到城墙顶面植物分布示意图。〔图十八〕

（六）城墙不合理利用

由于历史原因，神武门东西两侧城墙内修建有人防工程，防空洞位于城墙底部，与城墙外部人防工程相连，人防工程长约 40m，宽 1.5m，高 2m。这种大规模的开挖和扰动，改变了城墙受力条件，在洞室周边产生应力调整，理论计算表明，在开挖防空洞约 2.5m 的地方应力才不受开挖影响。而地下开挖对地面的影响范围，可以用地面建筑基底压力扩散定理分析可知，地下开挖对地面建筑有损害的范围约为 2.64m。我们还发现，由于展示照明等要求，城墙上布置了各种电缆和管线，一定程度上影响了城墙的排水通畅。



图十八 城墙墙头植物分布示意图

四 城墙保护对策初探

根据《中华人民共和国文物保护法》及《中国文物古迹保护准则》的要求，城墙保护应坚持日常保养维护，维护其原有历史风貌。由于目前对城墙的损伤现象是表观感性认识，所以仅针对出现的损伤和病害，建议采取一些保护措施。

(一) 清理树木，减少植被病害

城墙上的有害植被不仅影响了城墙的外观，更重要的是其发达的根系破坏了城墙夯土墙体的结构，造成裂隙的纵横发展，并成为雨水进入夯土内部的通道。因此清理城墙上的有害植被，控制其根系的发展是保护

城墙的关键。对于不同的植物类别应采取不同的方法清除。经咨询专业人员,对于乔木,由于其破坏性最大,应在粗壮根系形成前尽早清除,对于已经长得较大的如构树、桑树、榆树等除了锯掉地上部分以外,还应该及时杀死树根。对于藤本、灌木处理方法与乔木类似。草本植物的根系较浅,应该在其种子成熟之前,多次去除根系进行清除。

(二) 城墙墙体局部加固维修保护

对于城墙墙体损伤变形比较严重、已威胁城墙安全状态,则应采取维修加固方法以消除安全隐患。维修加固方案应由具有资质的专业机构提出,再请专家多方论证,保证能取得实际效果又不会对城墙造成新的损伤,制定详细的施工组织方案,对于新型化学材料和手段应进行多次模拟试验研究,确保无误方能实施。

(三) 保证城墙完整的防排水系统

由于多种因素,城墙原来的防水、排水系统受损严重,以致出现了城墙鼓胀变形、不均匀沉降等损伤,因此建立完整的防排水体系非常必要。通过清除有害植被,切断直接流入墙体的地表水,重新铺砌地面并辅以必要的防水材料等措施保证城墙排水通畅。

(四) 加强城墙保养维护,建立监测体系

在日常管理工作中,加强城墙的保养维护,不仅可以最大程度减少人为因素对城墙的破坏,而且可以将一些自然危害因素消灭在萌芽阶段,例如日常巡视中发现出现某些风化严重的城砖,但并未对结构形成影响,可以采用局部剔凿挖补的方法,既保护了城墙又不需要进行大规模维修。此外,国际世界遗产监测工作已经启动,2007年2月国家文物局出台了《中国世界文化遗产监测巡视管理办法》,初步构建起了我国世界遗产地监测管理的框架,因此建立紫禁城城墙监测体系显得尤为重要,通过监测能及时发现城墙变形位置、规模及变形量,不但留存了档案资料,而且便于对其安全性能做出评估。

五 结 语

紫禁城城墙作为我国目前保存完整的皇家宫殿城墙,蕴涵着丰富的科学文化内涵,课题组测试分析了城墙夯土性质,调查发现了城墙存在的六大损伤与病害,初步提出了保护对策、措施,探讨了未来城墙保护研究方向。科学合理地保护好古城墙将是文物保护工作者进一步探索研究的方向。

[作者单位: 故宫博物院工程管理处, 中兵勘察设计院]

(责任编辑: 赵中男)