

层析技术用于考古

——山西应县木塔的基础结构^{*}

冯 锐¹⁾ ** 阎维彰²⁾ 冯国政¹⁾
陶裕录¹⁾ 周海南¹⁾ 李晓芹¹⁾

1) 中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所

2) 中国太原 030002 山西省地震局

摘要 用高科技对古文物做无损探测具有重要意义. 本文介绍了用地学层析成像技术对山西应县木塔的探测结果. 阶基内部的填土为三圈结构: 内核坚硬均匀完好, 呈圆台状; 外侧面已有不少放射状的沟槽坍塌; 中圈层为加固层, 2~4 m 厚, 强度降低; 最外圈为保护层, 孔隙度很大, 承载力较弱. 在阶基内核里发现一个异常体, 上层呈圆形, 吸收系数反转加大; 下层呈长条形, 吸收系数很小. 该异常体可能为人工活动造成的扰动. 上部为松土充填的通道, 下部为隐蔽洞室. 阶基外围地基部分的结构均匀、完整、良好, 北侧两个松软弱化的区域与地下水的长期径流排泄有关. 木塔向西北和东北二方向的倾斜与地基北侧的继承性沉降运动、阶基外层的承载力较低、地震影响和木料变形等多方面因素有关.

主题词 应县木塔 地基探测 考古 电磁波层析成像 电阻率层析成像

引言

建于 1056 年(辽代清宁 2 年)的山西应县木塔——佛宫寺释迦塔——是我国现存最古老最高大的木结构塔式建筑, 稀世罕见(陈明远, 1980). 该塔共 5 层, 顶高 67.31 m, 底层直径 30.3 m, 阶基分两层: 上层阶基呈八角形(边长 14.9 m), 下层阶基呈方形(39 m×42 m). 虽然该塔的塔体较轻(自重仅 7 400 t), 并配有结实宽厚的基座, 但塔身已严重倾斜, 第 5 层在 N10°E 方向的水平偏差达 0.445 m. 从地质演化上看, 由中生代末期构造基础上发展起来的大同盆地, 到第四纪时存在反复的升降运动. 全新世以沉降为主, 新构造运动和地震活动的水平都较高. 1305 年和 1673 年怀仁-应县和天镇均发生 6.5 级地震. 巨大的地壳运动势必引起木塔基础出现不可抗拒的变形与破坏. 当然, 阶基的自然坍塌和人为的损坏也有一定影响. 据塔院区勘察报告指出^①: 木塔的阶基顶面已不处于水平状态, 东南高(相对高差+8~+13 mm), 并同时向北西和北东方向倾斜, 后二者的相对高差分别为

* 国家自然科学基金会资助项目(课题编号 49374203).
1997-03-25 收到初稿, 1997-12-25 收到修改稿并决定采用.

** 现在地址: 国家地震局地震数据信息中心, 邮编 100045.

① 应县木塔工程地质联合勘察队, 1994 年. 山西省应县佛宫寺塔院区工程勘察研究报告.

(-27~-68 mm)和(-36~-68 mm). 由于木塔并不是正八角形的, 还引起木塔的垂直轴心与木塔的重力垂线不重合又不平行. 采用无损探测技术(Noel, Xu, 1991; Miller, 1995)查明地基和阶基的内部结构, 以便为全面维修提供基础资料, 已成当务之急.

本文介绍了笔者采用电磁波层析成像(electromagnetic tomography)和电阻率层析成像(resistivity tomography)技术, 对应县木塔阶基和地基的探测结果, 发现了阶基内部存在一个异常的人工洞室, 揭示了地下古地层的起伏形态. 综合分析表明, 该木塔的塔基完整良好, 其木塔整体性向北东方向的倾斜是由于多种因素所引起.

1 原理

1.1 电磁波和电阻率层析成像

测定电磁波在不同方向上穿经待测物体的振幅量, 构成一组投影函数, 把 180°方向的投影函数组合起来, 再依 Radon 反变换求得待测物体内部吸收系数的二维分布图象, 即可据此推断出合理的物理和地质结论. 我们不妨用离散数据的褶积反投影公式表达图象重建的原理

$$f(x, y) = \frac{\pi}{M} \sum_{m=0}^{M-1} G[r \cos(\frac{m\pi}{M} - \varphi), \frac{m\pi}{M}] \tag{1}$$

$$G(n'd, \frac{m\pi}{M}) = d \sum_{n=-N}^N P(nd, \frac{m\pi}{M}) K[(n' - n)d] \tag{2}$$

式中, $f(x, y)$ 是目标函数, P 为观测数据, d 是射线间隔, $(2N+1)$ 为射线总数目, M 是投影方向的数目, K 为褶积的核函数. 不难理解, 密集的全平面射线($-\infty < l < \infty$)和 180°的完整扫描($-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$)——完全投影观测, 是取得稳定、收敛、精确解的两条关键条件.

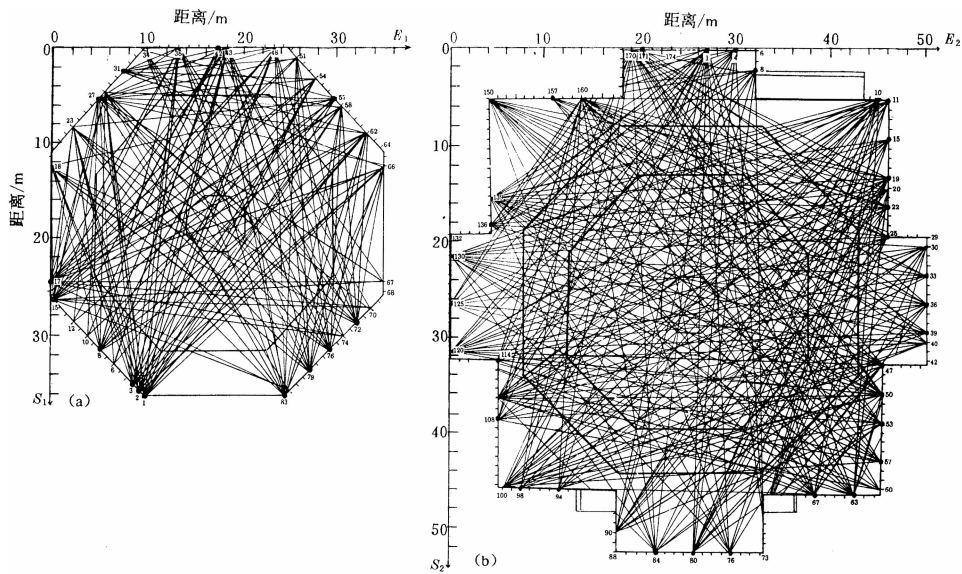


图 1 电磁波透射射线分布图

(a) 上层阶基实际射线数目 665 条, 为此图的 5 倍; (b) 下层阶基实际射线数目 2 906 条, 为此图的 10 倍. 两图中央最小的八角形区域为佛像的莲花底

医学 CT 容易满足式(1)、(2)，而地学 CT 则却极难实现. 有幸的是，应县木塔的塔基高出地面达 3.6 m，除个别地段(石台阶、小桥)影响仪器布设外，均可实施完全投影观测，为我们提供了至关重要的现场条件. 图 1 是对两层基座进行探测的电磁波射线分布图，它们在投影方向上的良好覆盖程度，大大降低了重建图象中因射线分布的非均匀性所引起的误差.

电磁波观测使用 EW-1 型电磁波层析成像系统，实测电场强度 E 为

$$E = \frac{E_0}{r} \sin^2 \theta \sqrt{1 + \delta\gamma + \delta\delta} \cdot \exp\left[-\int_L \beta dl\right] \tag{3}$$

式中， $\delta\gamma$ 为感应波动场效应， $\delta\delta$ 为感应场效应， E_0 为原地辐射常数； β 为介质吸收系数，即式(1)中的目标函数 $f(x, y)$ ，它主要依赖于电阻率的变化. 一般而言，除岩性差异外，松散的含水土层比坚实的干燥土层有更大的 β 值. 有关上式的计算细节可参见冯锐等(1997)文章.

电阻率层析成像是 80 年代中后期发展起来的一种新型地学 CT 手段，国内外已经取得应用于考古探测的经验(Noel, Xu, 1990; Qian *et al.*, 1995). 它的本质是二维或三维电法反演，即由边界处的电压、电流值反推区域内部电阻率的分布，求解泊松方程

$$\nabla \sigma \cdot \nabla U + \sigma \nabla^2 U = -I \tag{4}$$

式中， σ 是电导率($\sigma = 1/\rho$)， U 为电位， I 为内部电流源强度. 电阻率二维分布图象的重建采用反投影法(RBPT)和 Zohdy(1989)方法，正演计算用有限单元法. 计算方法的细节可参考文献(王兴泰, 李晓芹, 1996; 冯锐等, 1997; 李晓芹等, 1998). 野外测量使用 MIR 多功能直流电测仪. 考虑到多层电阻率结构的反演图象容易将尖锐清晰的地质界面平滑成渐变的梯度层，为得到界面埋深的定量结果，计算中不仅利用了钻孔资料进行约束，还同 Dahlin(1996)的措施相同，提取了部分点的垂直电法测深数据做一维简单层的反演，由此控制了二维图象的深度值.

1.2 观测系统

图 2 为两个电磁波水平截面与 7 条电阻率垂直探测剖面的位置(相应参数见表 1)，本文暂未收入 $RT_4 - RT_7$ 这 4 条非直线电法剖面的结果. CT 图象的原点在阶基西北角，上层(E_1, S_1)和下层(E_2, S_2)坐标的数值(单位：m)有以

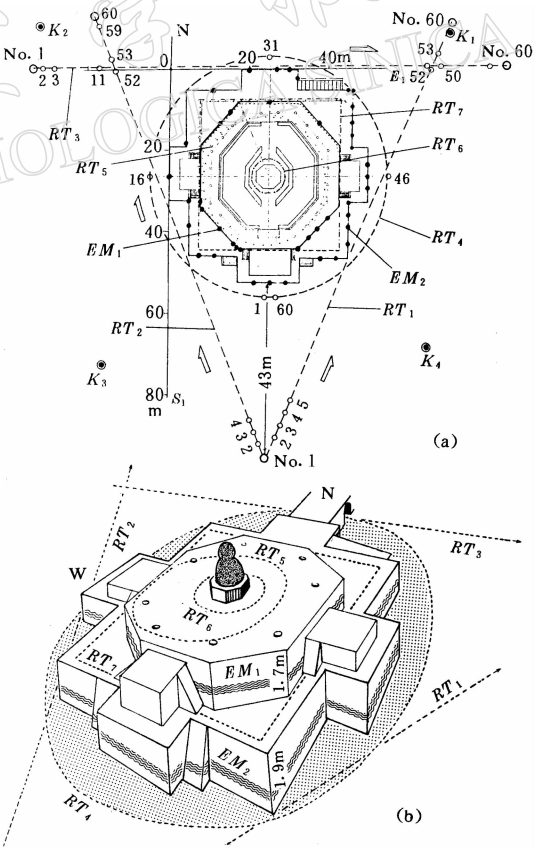


图 2 观测系统

(a) 电法测线与电磁波发射点的平面分布. K_1, K_2, K_3 和 K_4 为工程钻孔的位置；(b) 木塔阶基与电磁波二水平截面的透视示意图

下关系：

$$\begin{cases} E_1 = E_2 - 8 \\ S_1 = S_2 - 8 \end{cases}$$

(5)

电磁波测量时接收机的测点间隔 1 m，电阻率测量时电极阵列的电极极距 2 m. 两种图象的反演模型网格均为 1 m×1 m，CT 图像分辨可按 2 m 估算. 电磁波 CT 以探测二层阶基的内部结构为主要目的，再结合实验室内对电磁波吸收系数的测定结果进行解释推断. 电阻率 CT 以探测深度在 20 m 内的地基分层特征为主要目的，再根据 4 个工程钻孔的取芯和分层结果，对电性剖面做地质分析.

表 1 电磁波(E)和电阻率(R)层析剖面的观测参数

No	种类	剖面	测点间隔 /m	层析图象	简 述	工作频率 或方式
1	E	EM ₁	1	水平剖面 吸收系数	上层阶基水平截面，距顶面 1 m(距地面 2.6 m)，定点发射共 14 点，射线总数 655	16 MHz
2	E	EM ₂	1	水平剖面 吸收系数	下层阶基水平截面，距顶面 2.8 m(距地面 0.8 m)，定点发射共 29 点，射线总数 2 906	16 MHz
3	R	RT ₁	2	垂直剖面 电阻率	NE 方向，测线总长 118 m，位于塔基东侧地面	Wenner
4	R	RT ₂	2	垂直剖面 电阻率	NW 方向，测线总长 118 m，位于塔基西侧地面	Wenner
5	R	RT ₃	2	垂直剖面 电阻率	EW 方向，测线总长 118 m，位于塔基北侧地面	Wenner

2 木塔阶基的内部结构

2.1 EM₁ 层析图象

上层阶基的内部由内核区、加固层和保护层这 3 个圈层组成(图 3)：近圆形的内核区(图中 A)坚硬均匀，吸收系数很低(小于 0.28/ m)，含钙质较高，可能为混有白石灰的夯实土，四周有明显的放射状坍塌沟槽；东北角(图中 E)有块近 5 m 的坍塌区域. 中间一圈是加固层(图中 B)，厚约 2 m，可能是后人对内核区进行维修所形成，其外缘已经变成较好的圆形，吸收系数增到 0.34/ m. 最外一圈则是近代用回填土形成的保护层(图中 C)，同基座外缘的石砌墙体连在一起，它的承载力相当弱，高吸收系数(0.47/m)占了大部分区域. 不难看到，图 3 中用黑点表明的木塔回廊最外侧 24 个立柱的位置都位于该承载力最弱的区域，它们的非均匀沉降幸好只影响到木塔底层重檐的变形，而且东北角的回填土(图中 F)显然经过人工的夯实处理，介质的吸收系数表现为低值.

木塔在上层阶基顶面还有两圈主要的承重顶柱，其位置均在内核区和加固层内部，故可以推断，造成木塔倾斜的主要问题是出在外圈立柱上. 在基座内核圈的中心偏南，水平坐标(E₁=17 m，S₁=22 m，即大佛莲花座正前缘处)，发现一个直径约 2 m 的圆形异常区(图中 G₁)，吸收系数反转增大至 0.3/ m. 分析表明，能使坚硬的内核区出现局部的松软，最可能是由人工活动引起的.

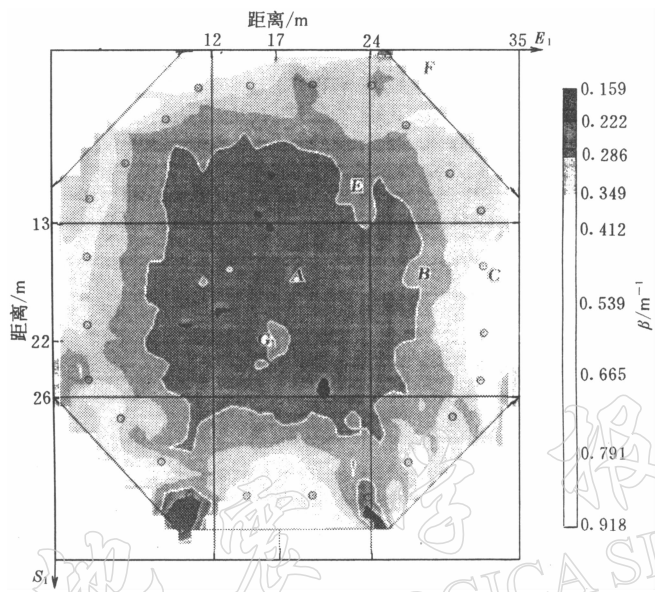


图 3 上层阶基的电磁波层析图象 EM_1 。该图为介质吸收系数的分布，内核部分的吸收最小，在中心偏南有一个直径 2 m 的异常区。外侧吸收最大。黑点标明了回廊立柱的位置

2.2 EM_2 层析图象

下层阶基的层析图象显出了与上层同样的内部结构(图 4)。吸收系数低于 0.20/m 的内核区(图中 A)呈长圆形，四周放射状的齿状线可能为基土下滑塌落造成的沟槽。中间加固层(B)的外直径 37 m，刚好略大于上层八角形阶基直径约 36 m 的范围。在回填土层(C)层 F 处的土质已经过夯实硬化处理，吸收系数减小，是前人为克服地下水对地基的湿陷所留下的维修痕迹。

由 EM_1 和 EM_2 两幅 CT 图象可推算出该圆台状内核区的坡度为 39° ，加固层的坡度为 25° 。应特别指出，在坚实的内核区的中间部位，坐标($E_2=25\text{ m}$, $S_2=30\text{ m}$)处存在一个 $2.5\text{ m}\times 7\text{ m}$ 长条形的甚低吸收($\beta\leq 0.16/\text{m}$)异常区(图 4 中的 G_2)。它的水平位置刚好同上层 CT 图象(图 3)中的异常区 G_1 重合，二者会有内在的沟通。据实验室对大量岩样吸收系数测定的结果，排除为花岗岩、石灰岩、砖瓦的可能性。目前只能用基座内部人工挖掘的洞室来解释。在基座内核区($E_2=25\text{ m}$, $S_2=23\text{ m}$)处还有一个低吸收区 G_3 ，直径约 2 m，平面位置为大佛莲花座后边缘，可能是另一个人工洞室，它与 G_2 区是否在更深处有所沟通，目前尚不知。

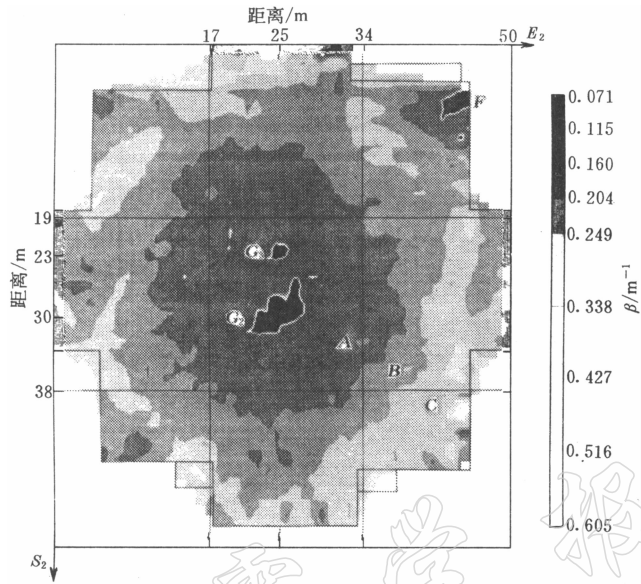


图 4 下层阶基的电磁波层析图象 EM_2 ，内部结构与 EM_1 相同。
在中心有两个异常区，分别位于大佛莲花座的前后边缘

3 塔院地基的分层结构

3.1 RT_1 层析图象

除测线南侧的表浅部出现 3 m 厚的高阻(人工填土)层外,可大体以 10 m 深为界划分成上下两大基本层(图 5a). 上层电阻率值小于 $15\ \Omega \cdot m$, 低阻的中心在 A 和 B 二处. 钻孔资料揭示, 这是一个以中细砂为主的蓄土层. 测线北侧的低阻层几乎从地表一直延续到 12 m 深, 是持续至今的长期沉降区域. 中间部位(水平坐标 45~70 m 图中 P 处)存在一个从地表以高角度向下延伸的高阻区, 宽度约 28 m, 推断是木塔的塔基.

图 5 中还用黑三角注明了在 K_1 和 K_2 钻孔内发现的古代陶片、碎砖、碎瓦的位置(图中 g 和 h). 经鉴定, 这些古文化碎屑的年代分别在 760 年前和 780 年前. 表明该剖面的低阻区在当时正为浅水和滨湖的位置.

3.2 RT_2 层析图象

该剖面的分层特点(图 5b)与 RT_1 剖面相同. 但是高阻层的上界面不仅深度整体加大(达到 12~17 m 深), 而且由上覆低阻层向下部高阻层的过渡厚度也增大. 看来, 这部分地层在最近的 1 千年间经历过强烈的沉降运动, 并以西北端 C 区最为突出.

木塔塔基位于水平坐标 44~72 m 图中 P 处, 地表高阻值的人工填土层已经解体, 深度上虽下有延, 但与大约 15 m 深处的坚实高阻土层已缺乏紧密的连结. 引人关注的是, 在该剖面的塔基中心处深度 6 m 附近出现了一个弱化的局部低阻区(图中 D), 要比 RT_1 剖面在同样水平坐标处的异常区 D 更明显, 说明地下水对塔基根部的管道状浸入或液化是有影响的. 上述一系列剧烈沉降的特点是该图象所提供出的最重要的信息.

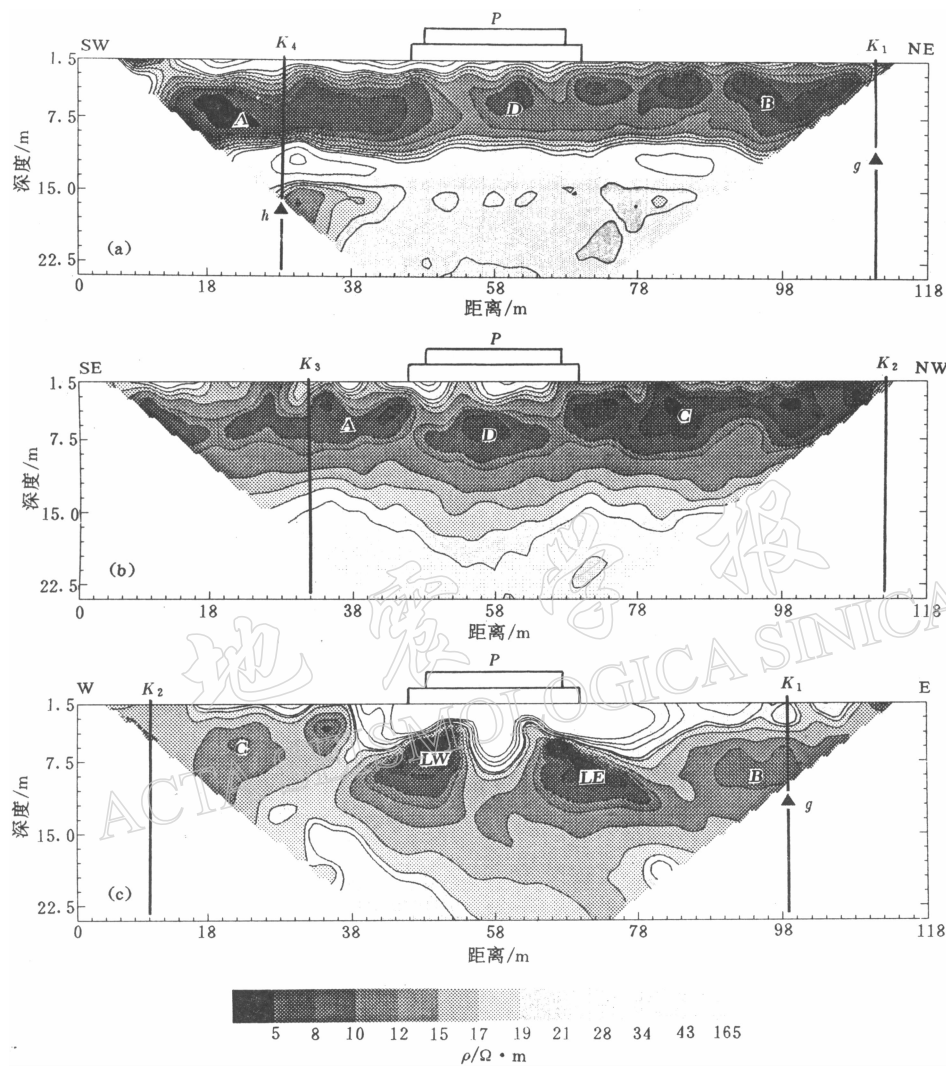


图 5 电阻率层析图象. (a) RT_1 的图象, K_1 和 K_4 为钻孔; (b) RT_2 的图象, K_2 和 K_3 为钻孔; (c) RT_3 图象, K_1 和 K_2 为钻孔

3.3 RT_3 层析图象

这条东西走向的剖面(图 5c)的两端靠近工程钻探的 K_1 和 K_2 孔, 在中间部位 9 m 以浅出现的高阻区反映着塔基北部大雄宝殿地基影响. 在 RT_1 和 RT_2 剖面中所述 10 余米的高阻层上界面, 在该处已经下沉到 22 m 深, 由高阻到低阻的过渡层厚度更大(深度为 18~25 m). 低阻层分化成东西两个不相连的区域 B 和 C. 西侧低阻区 C 的下底已经抬升到 10 m 深, 与 RT_2 剖面 NW 端的异常区 C 相吻合, 看来塔基西北方向的古湖泊的中心位置可能要更远离木塔. 令人注目的是, 在紧靠塔基北边缘中心线的两侧各存在一个软弱的富含地下水的低阻区域——LW 和 LE. 西侧深度为 6~12 m; 东侧的规模更大, 深度为 7~13 m, 且与东北端的低阻区 B 连成一体. 它们对木塔基座在西北与东北端造成的严重沉降影响不

容忽视.

4 结论

4.1 塔基的沉降与维护

应县木塔的倾斜要求人们重视地基的稳定性. 本次探测查明, 只有东南部在 10 m 深以下存在水平状土质坚硬的地层, 所含有的较大的钙镁质使砂粒和粘土固结, 同时出现了电阻率的明显增高. 这是冲洪积或湖沼环境下的粘性土, 有较高的抗剪性能并成为塔院浅水的隔水层. 木塔塔基稳定性的维系会在很大程度上依托于这一层. 遗憾的是, 这个土质坚硬层向西北方向和正北方持续下倾.

历史上, 应县木塔相继在金(1195 年)、元(1320 年)、明(1508 年)、清(1722 年, 1866 年)进行过 5 次较大维修, 平均间隔 162 年. 按钻孔资料对地层沉降量的估算, 每 150 年, 塔基北侧要比塔基南侧多沉降 0.7 m 左右. 对这个数量级的变化, 降雨会在塔院北侧地面上形成严重的积水(如清康熙六十一年(1722 年)维修记中即有“见塔(院)低洼, 时遭水浸”; 清乾隆五十二年(1787 年)维修记中有“风雨浸圯”等字样). 我们推测, 古人最可能采取的简便办法是对塔基的加固层填土夯实, 它可以有效地排挤掉塔基的过多地下水、降低地基的湿陷效应. 所以, 在阶基的 CT 图象中出现了内核区、加固层和保护层的 3 层圆台状结构. 今后维修木塔的塔基时, “填土夯实”可能仍然是必不可少的措施之一.

4.2 阶基内部的异常体

表 2 给出了我们在实验室内对几种常见岩石吸收系数的测量结果. 选取了相同频率(16 MHz)和相近状态(干燥)的测定值.

表 2 高频电磁波吸收系数 β

岩石	β/m^{-1}	岩石	β/m^{-1}
泥质砂岩	0.24~0.86	页岩	0.02~0.04
砂卡岩	0.04~0.51	花岗岩长岩	0.01~0.02
砂岩	0.02~0.05	灰岩	0.01~0.04
花岗岩	0.01~0.11	角岩	0.01~0.02

可以看出, 木塔阶基内部的吸收系数值(0.2~0.4/m)靠近于表 2 中的泥质砂岩, 故推断阶基内部为砂粘土一类的硬质土. 但是对两幅层析图象中在相同的平面位置上(佛像正前缘)出现的异常区, 上层 G_1 的吸收变大、下层 G_2 的变得很小, 二者高差仅 2 m, 则很难用特定的土质和岩石来解释. 目前看来, 极可能是人工活动造成的: 上部是由松散土掩盖的通道(高吸收介质)、下部为洞室(吸收系数最小). 我们期待着以后的开挖能检验这一推断.

4.3 塔基状况

对地面上的阶基至地面下的基础进行了较详细的探测, 确认塔基内部的结构均匀、完整、良好, 只是在塔基的北侧出现了两个松软弱化的区域. 西北和东北侧基座的沉降有多方面的因素, 地面继承性的非均匀沉降是主要原因, 建议在塔院区对木塔的基础做整体性加固.

本工作曾经得到高可、曹安吉、杜福等同志的关心和支持；张畅耕、张之平和莫涛同志曾在学术上给予帮助；参加现场工作的还有刘庆芳、郝锦绮、孙次昌、王国强、李自红、李海亮、梁建民和薛起。在此一并致谢。

参 考 文 献

- 陈明远, 1980. 应县木塔. 北京: 文物出版社. 243
- 冯锐, 陈家庚, 郭强绪, 等, 1992. 电磁波井间层析技术在城建工程中的应用. 地球物理学报, **35**(增刊): 348~356
- 冯锐, 马奎祥, 郭鸿, 等, 1997. 电磁波层析成像——图象的一致性及地下水探测. 地震学报, **19**(5): 524~534
- 冯锐, 李晓芹, 陶裕录, 等, 1997. 电阻率层析成像用于水文地质勘探. 地震学报, **19**(6): 655~663
- 李晓芹, 陶裕录, 冯锐, 1998. 电阻率层析成像的原理与初步应用. 地震地质(待刊)
- 王兴泰, 李晓芹, 1996. 电阻率图象重建的佐迪(Zohdy)反演及其应用效果. 物探与化探, **20**(3): 228~233
- Dahlin T, 1996. 2D resistivity surveying for environmental and engineering application. *First Break*, **14**(7): 275~283
- Miller M, 1995. Maya masterpiece revealed at Bonampak. *National Geographic*, **187**(2): 50~69
- Noel M, Xu B W, 1991. Archaeological investigation by electrical resistivity tomography, a preliminary study. *Geophys J Int*, **107**: 95~102
- Qian F Y, Tanaka Y, Zhao Y L, *et al*, 1995. Resistivity tomography with surface electrode arrays and its application in archaeology in Backwater Region of Three Gorge Reservoir. CT 理论与应用研究, **4**(2): 40~50
- Zohdy A A R, 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, **54**: 245~253