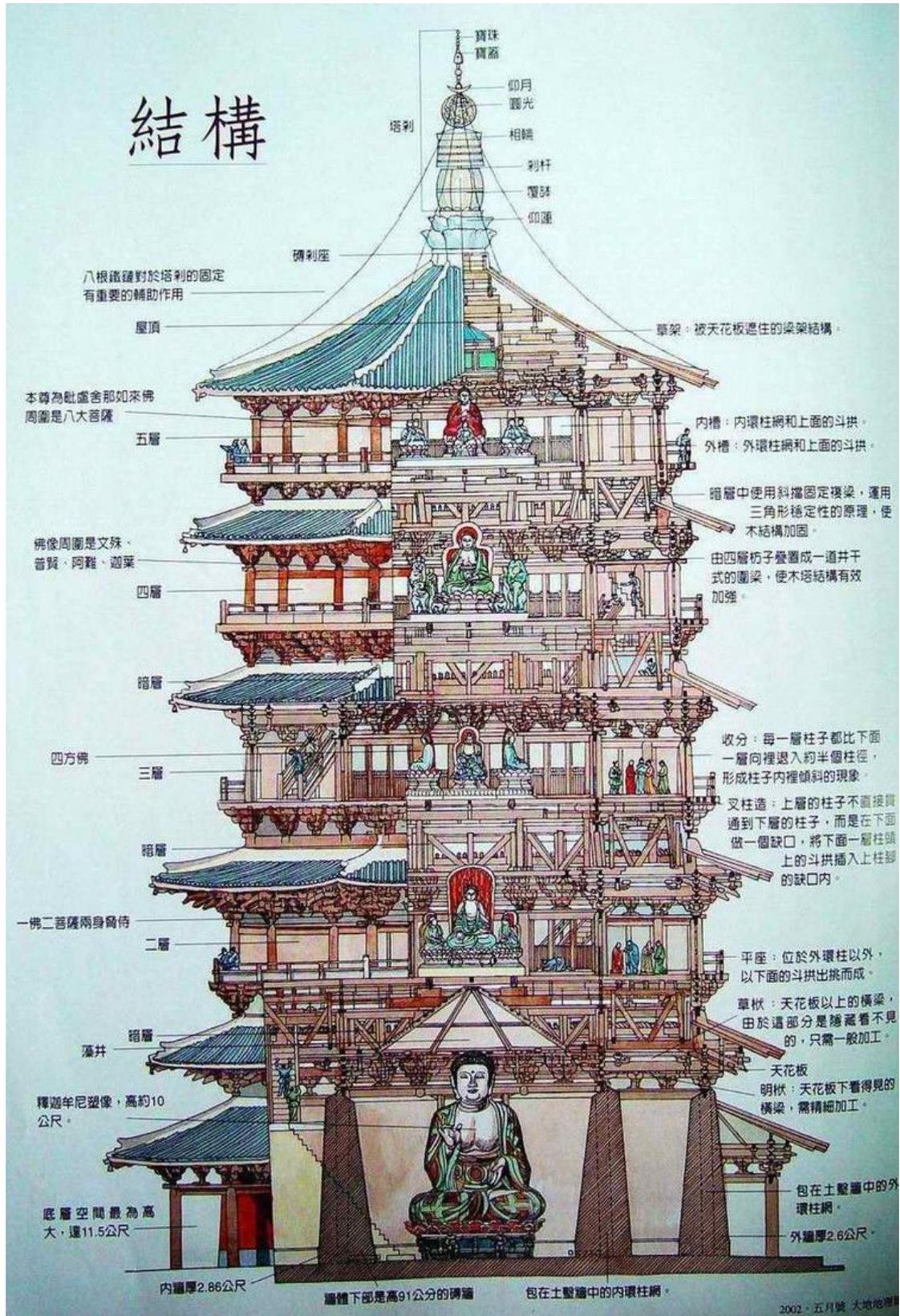


应县木塔的结构思考



我在开始写博客的时候，为了填充数量，专门在网上找了一些应县木塔的介绍，杂放在一篇里，觉得要是想看的话，就直接看，免得还要再搜索，另一方面的原因是既然是做结构的，中国好容易有个千年不倒的建筑，自己也得知道个一二三的。

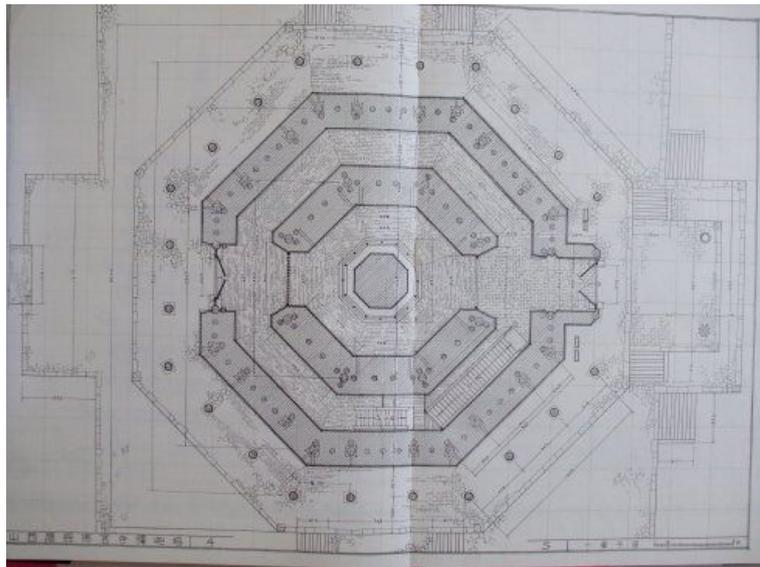
话说这两年做了几个仿古建筑，不过基本是以现代结构方式去做的，与真正的古建相差很远，以当今结构理念，很多古建做法是不可接受的，举个简单例子，很多古建筑的梁上柱是浮搁在大梁上的，我就说应该要做连接固定，古建专家想了想说，好像营造法式里都是这样做的，说不定做了连接固定反倒出问题。话说实践出真知，我没有确定的理由说这是不对的，只好自己多学习，经常看古建的书籍，营造方面，只有建筑的东西，结构的东西需要自己琢磨。

前几天看到一本应县木塔的研究报告，写于2013年，大概介绍近20年的保护历程，报告中有些研究成果和实际发现很有意思，主要是结构方面的，特记录下来：

- 1、木塔塔基由两部分组成，其一中心部分（八角塔基）由人工夯实的粉土组成，夯实效果良好；其二外围保护层（四方台）由夯实较差的粉土组成。经过塔基土及天然地基土承载力分析和沉降分析，塔基的承载力和实际沉降值均能满足木塔的荷载需要，塔基现有的沉降和倾斜不是木塔扭曲变形的主要原因。场地内天然地基为不液化土，地震烈度7度时，场地为不液化场地。场地为中软场地土，场地类别为Ⅲ类，场地为对建筑抗震有利地段，可不考虑场地的震陷问题，地下水无不利影响。按照现在的理论，木塔所在场地类别为二类，中硬场地土，地下水埋深在-1.8~2.0米，场地内天然地基为不液化图，在地震烈度

为 7 度时，场地为不液化场地。这点结论应该是经过千年实践考验，应县木塔前后经历过 40 多次大级别地震，如果场地有问题，大家只能在文献中遐想它的风姿。中国文学真的有一手，比如我做的洛阳天堂项目，古书中写得老巍峨漂亮啦，可是你就是搞不清楚她的三围数据，李白一句飞流直下三千尺，你就翱翔吧！

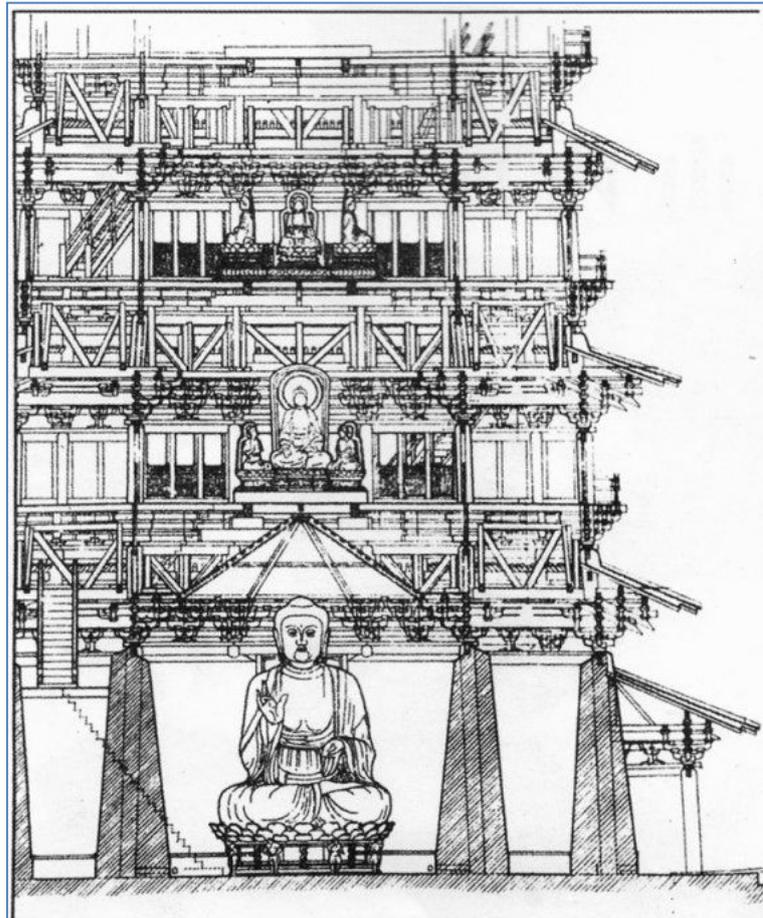
- 2、应县木塔的高度大概是 65.83 米，这是到塔刹顶部的高度，塔刹高约 10 米，也就是塔刹座高度大概是 55 米，如果按顶层平顶算高度大概是 50 米，比最顶上一层坡顶檐口还要高两米左右。底层外圈柱的宽度大约为 18 米，高宽比是 3，这是个非常重要的数据，我记得埃菲尔铁塔也是 3。



- 3、应县木塔塔座高度大约是 2 米，底层高度大约为 8.5 米，设内外两层土坯墙，将两圈木柱包裹在墙内，内圈墙底宽 2.7 米顶宽 1.66 米，外圈墙的款 2.7 米顶宽 1.7 米，底部墙体面积约为 270 平米，这是什么概念？在低频激励下，相对于上部结构，底层基本没有位移，也就是规范经常说的竖向抗侧刚度相差太大，木塔的高度可以把塔座和底层扣除，

也就是木塔高度为 40 米，高宽比是 2.222222222222，千年不倒是因为够二！试想一下千年之后，这个世界上能保留多少个高宽比超过 10 的建筑，而且是你设计的？

- 4、 古建的特点是可以变形，所以应县木塔的尺寸一直在变化，就像人一样，塔的高度在不断降低，这种降低好像更多的是因为重量把下部的一些节点的木头压碎造成，以及木结构最显著的扭闪形成。扭闪的结果就是塔的“三围”尺寸也是变化的，八个边的长度没一个是完全相同的。现代意义的刚性楼板在这只能是扯淡，首先中间的洞口面积过大，其次楼板都是一块块木板组成，之间缝宽得很，水平传力估计是佛祖在玩。



- 5、 古代匠人也喜欢用桁架支撑，应县木塔里有很多地方在用，土坯墙上面

暗层就是木桁架层，也算是侧向刚度过渡。不过塔内的桁架支撑并不向我们想象那样很均匀的布置，平面不均匀，竖向也不均匀，估计一千年以前的工程师没有很好地参加继续教育学习，觉得不爽就把某段桁架支撑给取消，比如二层平座内外柱间斜撑在西北角给取消掉，到了三层把整个东边的内外柱间斜撑给干掉，上面也是变化多端，刚心与质心的节操粹了一地！

- 6、利用现在技术测得，木柱的最大稳定压应力 3.34N/mm^2 ，规范允许值是 17N/mm^2 ，实测木塔上取下来的木材强度，估计是极限强度是 57.3N/mm^2 ，应力比仅 4.7%，这个好像很轻松呀，不过轻松才能上千年。
- 7、应县木塔自振频率（测量数据），一阶为 0.635Hz ，二阶是 1.660Hz ，三阶是 2.783Hz ，两个方向基本接近，好像比较刚强。