

塔尖为什么会断 ——浅谈地震鞭梢效应

文 / 张攀

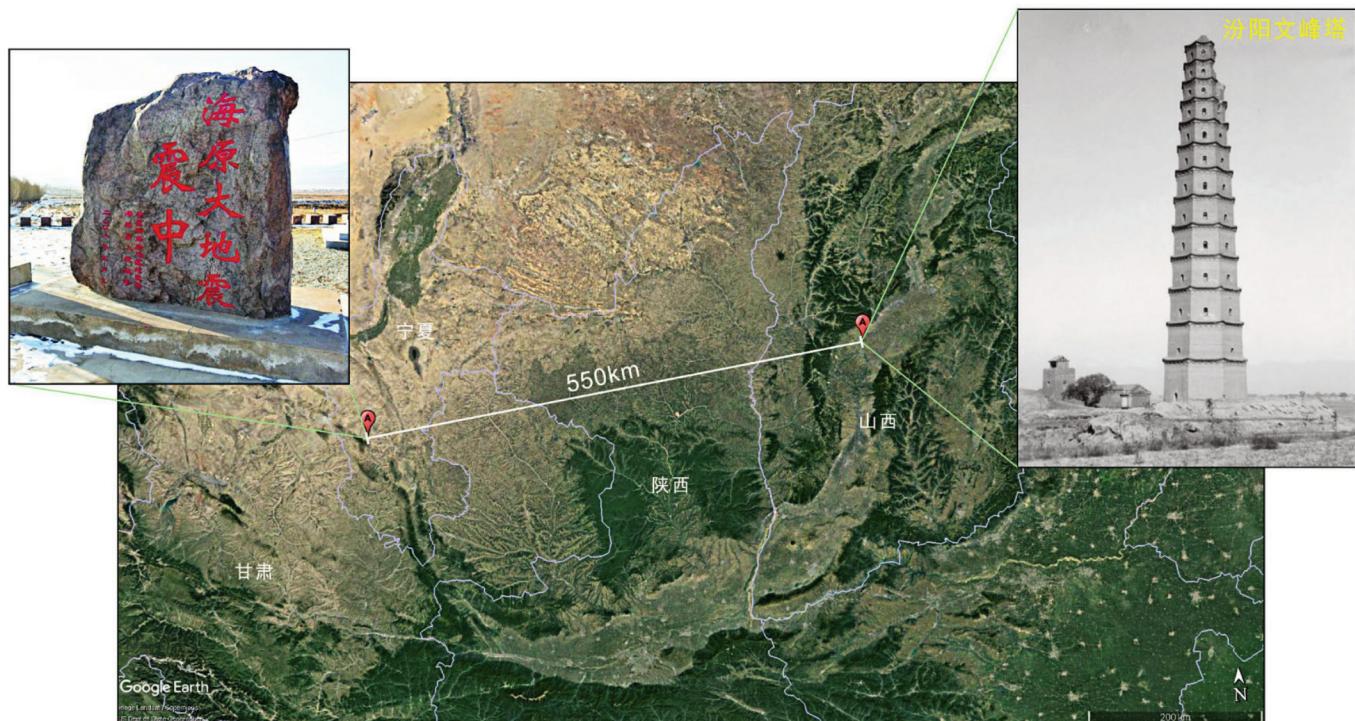


图1 1920年海原地震震中位置及汾阳文峰损毁情况（图片来自于网络）

1920年12月16日，宁夏回族自治区海原县发生了8.5级特大地震，强烈的地震动持续了十余分钟，几乎撼动了大半个中国，又被称为“寰球大震”。海原地震累计造成近27万人遇难，是中国历史上最大的地震灾害之一。海原地震后人们惊奇地发现，在距离震中550余公里的山西汾阳，始建于明末清初的文峰塔顶部的11层至13层被严重破坏，塔顶也不翼而飞，而塔身其余部分基本完好（图1）。古高塔塔顶受地震损毁的这一现象并非孤例，历史上多次地震震害表明，相比于塔身，塔顶或塔尖在地震作用下更容易遭受破坏。

塔尖被震断的国内外实例

明朝嘉靖三十四年十二月十二日深夜（公元1556年1月23日），陕西关中地区的华县发生了 $8\frac{1}{4}$ 级特大地震，地震波及周边方圆几十万平方公里，造成约83万人在大地震中遇难，无数建筑顷刻倒塌。据史料记载“潼、浦之死者什七，同华之死者什六，渭南之死者什五，临潼之死者什四，省城之死者什三”。受此次地震的影响，原本15层的西安小雁塔的塔顶两层被震毁，至今只保留了余下的13层（图2）。



图2 西安小雁塔现今面貌 (a) 及复原图 (b) (图片来自于网络)

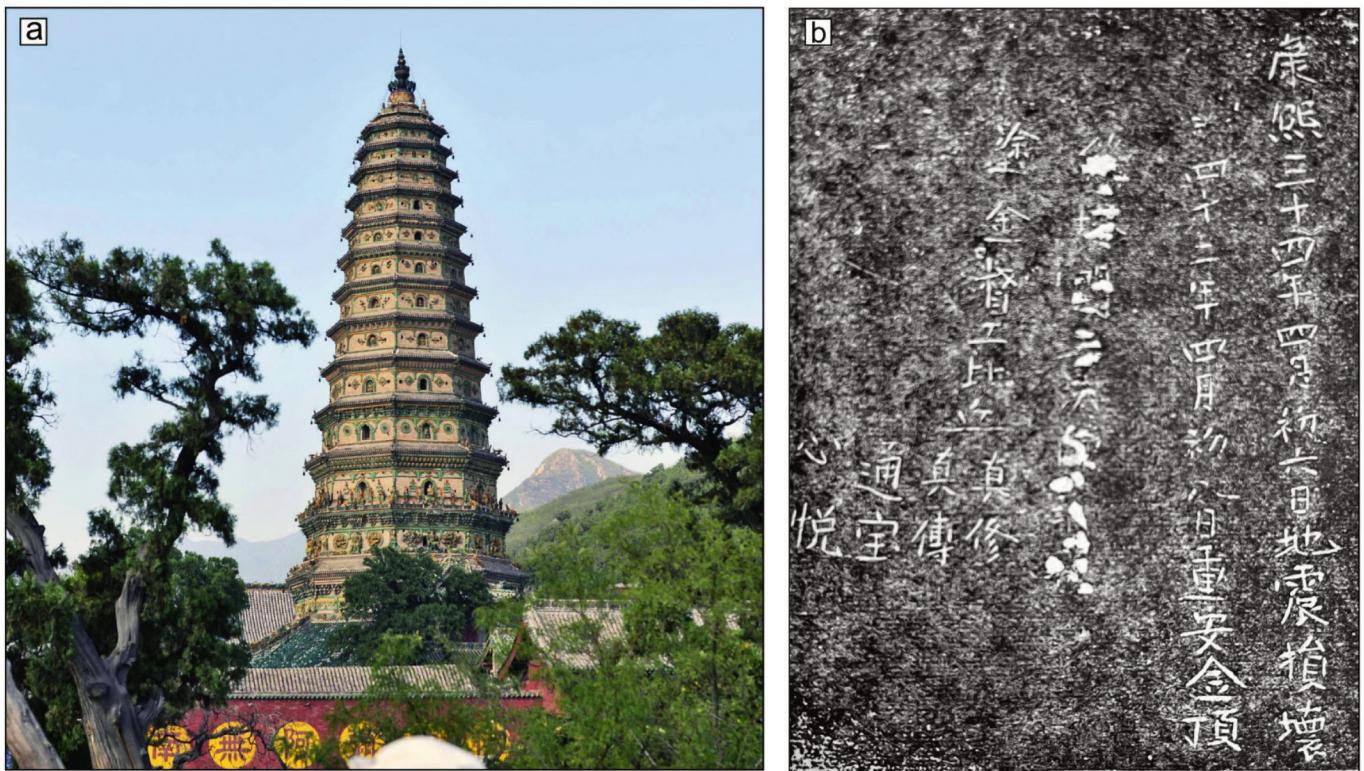


图3 洪洞县广胜寺飞虹塔 (a) 及塔顶碑文 (b) (图片来自于网络)

康熙三十四年六月初六(公元1695年5月18日),山西临汾发生 $7\frac{3}{4}$ 级地震,临汾城内大云寺碑刻记载:“忽遭震变之灾,寺庙倾塌,民舍无存”、“地声如

雷、经年不息”;地震以后,临汾一带“城廓房舍存无二三,居人死伤十有七八”。1964年文物工作者在修复临汾北部洪洞县的广胜寺飞虹塔时发现,塔顶上



图4 克罗地亚圣母升天大教堂地震前(a)及地震后面貌(b)(图片来自于网络)

刻有“康熙三十六年四月初六地震损坏，四十二年四月初八重安金顶”的碑文(图3)，表明飞虹塔的塔顶在1695年临汾地震时被损毁，到1703年又重新安装了金顶。

在国外，有关地震时塔顶被损坏的现象也是屡见不鲜。2020年3月22日克罗地亚首都萨格勒布以北地区发生5.5级地震，萨格勒布震感明显，地震造成一些市民受伤或被困，部分市区建筑受损。受地震影响，位于萨格勒布市中心的地标性建筑圣母升天大教堂南侧塔尖被折断脱落，北侧塔尖也受到结构性损伤(图4)；随着余震不断，北侧塔尖也存在断裂脱落的风险，所以当地政府随即拆除了北侧塔尖(图4)。

以上类似的现象还有很多，比如1976年唐山大地震后，7层楼高的天津南开大学主楼的主体部分震害较小，但其顶部的三层小塔楼震害严重。2008年的汶川大地震中，许多远离震中的高层建筑，其顶部带有的电信塔、发射塔架、电梯间等结构都出现了严重的破坏，而建筑主体则基本完好；另外，受汶川地震的影响，四

川境内多处古塔塔顶倒塌或损毁。上述这些例子均表明，地震时高层建筑顶部的小结构更容易遭受破坏，这种现象被称作地震作用下的“鞭梢效应”。

地震“鞭梢效应”产生的原因

地震通俗来说就是地面振动或摇晃，天然地震产生的原因主要包括火山活动、地表或地下陷落和深部岩层突然的断裂错动，其中我国和世界上发生的绝大多数破坏性地震都是由岩层突然的断裂引起。岩层破裂过程中会以振动的形式释放出巨大的能量，并通过地震波从震源向四处传播。地震波传播的方式分为三种，分别是纵波(P波)、横波(S波)和面波(L波)。其中，纵波是推进波，在所有地震波中前进速度最快，纵波使地面发生上下运动，破坏性相对较弱。横波前进速度仅次于纵波，横波的振动方向与波的前进方向垂直，因此来自地下的横波能引起地面的水平晃动，是造成建筑破坏的主要原

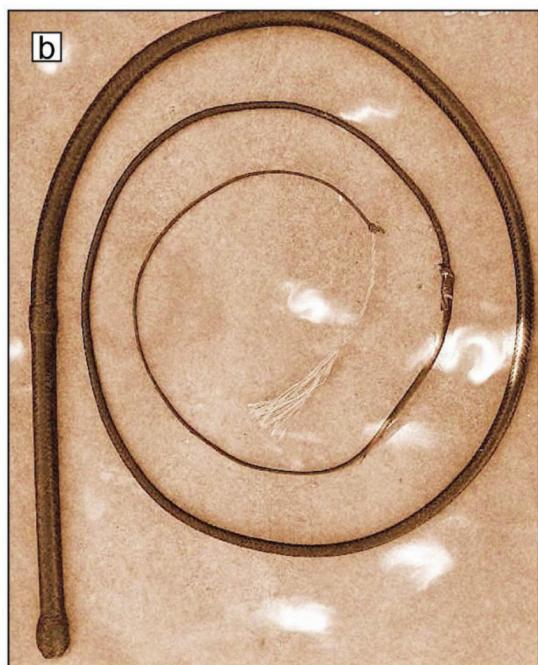


图5 (a) 健身鞭甩动时鞭梢振动速度剧增; (b) 健身鞭结构 (图片来自于网络)

因。面波是纵波与横波在地表相遇后激发的次生波，其波长大、振幅强，且只沿地表传播，是造成建筑物强烈破坏的主要因素。

地震发生后，纵波首先到达地表，人们感受到的是地面的上下振动，随后横波和面波依次到达，地面开始强烈的侧向振动。地表建筑在横波和面波的作用下发生水平晃动，而对于高层建筑而言，地震引起的振动自下而上传播，建筑物顶部的小结构或细长突出部分由于质量的突然减小，在每一个来回侧向振动的瞬间，其振幅和摆动速度往往突然增大，当这种振幅和摆动速度超过结构的抗扭刚度时，便会造成结构损伤。这种现象与我们挥动鞭子时，鞭梢振动急剧加速类似，因此被称为“鞭梢效应”。在一些公园中我们经常可以注意到，当健身爱好者拿着很长的健身鞭甩动时，鞭子末端会发出很大的响声（图 5a）。这些鞭子都有一个共同的特点，即鞭子向尾端方向逐渐变细，并且鞭梢往往为非常轻软的材质（图 5b）。简单来说，当人给鞭子一个初始的振动后，随着振动向鞭梢传播，根据能量守恒定律，由于质量逐渐减少，振动速度将会逐渐增大，鞭梢的速度甚至可以突破音速，

产生音爆现象。

地震“鞭梢效应”的预防

“鞭梢效应”在《工程抗震术语标准》中的定义为：在地震作用下，高层建筑或其他建筑物顶部细长突出部分振幅剧烈增大的现象，在工程结构中，通常突出屋面的楼梯间、水箱、高耸构筑物等都要考虑鞭梢效应的放大系数。不同国家在建筑物的设计中，为避免或减轻“鞭梢效应”带来的危害，均制定了明确的抗震设防标准，如我国《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)规定，对于突出楼顶的屋顶间、女儿墙、烟囱等的地震作用效应计算时，宜乘以3倍的增大系数；日本建设省颁布的《高层建筑设计指南》对建筑主体规定的水平地震系数为0.2，屋顶小塔楼为1.0，实质上是按加大5倍的增大系数来处理。对于个人而言，在地震逃离时，要远离顶部存在突出结构的建筑物，并注意观察和躲避坠落的物体。■