

# 中國古橋學

〔第十九期〕

北京茅以升科技教育基金會  
中國古橋研究與保護委員會

二〇二〇年八月

## 目 录

“树驮桥桥驮树”石拱桥结构有限元分析.....	1
悠悠大运河 风雨拱宸桥.....	14
杖国之年，赤子之心 ——记古桥摄影家吴礼冠先生.....	22

# “树驮桥桥驮树”石拱桥结构有限元分析

汤永净<sup>1,2</sup>, 蔡铭飞<sup>2</sup>, 秦海洋<sup>2</sup>, 关贤军<sup>3</sup>

(1. 同济大学浙江学院 土木工程系, 浙江嘉兴 314051; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 3. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092)

**摘要:** 三环桥位于安徽宿州境内, 是一座建于清朝乾隆年间的半圆形三孔厚拱石拱桥。由于环境和石拱桥本身材料等因素, 一棵枫杨树由桥墩开始生长, 逐渐贯穿三环桥桥身结构, 最终破石而出继续生长形成了“树驮桥桥驮树”的奇特景观。本课题通过研究该景观形成的受力形态以及石拱桥结构与树木结构的相互作用, 利用通用有限元软件 ANSYS 进行数值计算, 为类似的生物与建筑结构共生的案例提供一定的参考。

**关键词:** 石拱桥; 树木; 共生; 受力形态

## 1 概述

石拱桥是我国传统桥梁形式之一, 历史悠久。东汉时期就已出现单跨石拱桥。较为著名的石拱桥包括世界上第一座敞肩式单孔弧形石拱桥赵州桥、修建于金代的北京卢沟桥以及唐代建造的苏州宝带桥等。石拱桥特点包括造型优美、取材方便、造价低廉、承载潜力大等, 因而在历史上被广泛采用。

石材是脆性材料, 抗压强度高, 受拉强度低, 一般约为抗压强度的十分之一。因此大多都采用拱形结构。拱形结构在竖向力作用下, 拱脚处产生的水平力可以在拱形结构中产生反弯矩, 从而大大降低拱形结构中偏心力的偏心距, 使拱形结构以受压为主, 从而克服石材抗拉强度不高的特点。

## 2 石拱桥计算理论简述

石拱桥建造在很早就已经开始, 但是过去多依靠工匠的实践经验来保证石拱桥使用的安全性, 直到近现代才开始对石拱桥的理论研究, 但是对于圪工拱桥的理论发展迅速。石拱桥受力最主要的部分之一就是拱轴线, 拱轴线是拱圈截面形

心的连线,根据各种荷载情况,拱桥结构常用的拱轴线形状包括圆弧线、椭圆线、抛物线和悬链线等。拱轴线的形式不仅影响拱圈的受力分布及截面应力大小,而且与结构的耐久性、经济性和施工安全有着密切的关系。目前对于实腹式石拱桥成桥后的拱轴线一般采用悬链线,而对于空腹及部分空腹石拱桥,一般采用“五点重合法”来拟合拱轴线,即要求拱轴线在全拱有五点(拱顶、拱脚、两个四分之一截面处)与相应的三铰拱自重压力线重合。但是这不能保证在其他截面石材不受拉,并且不能保证施工过程中主拱圈的稳定,因而实际更多地采用悬索线拱轴线代替悬链线拱轴线。

## 2.1 平铰拱理论

拱桥结构分析中主拱一般按无铰拱取计算模型,拱圈中的内力不仅有轴力,还有剪力和弯矩。在轴力和弯矩的组合作用下,弯矩较大截面处可能出现拉应力并产生裂缝,从而对石拱桥结构产生影响,改变结构的力学特性。裂缝的出现不仅会引起裂缝截面上的应力重分布,而且还将产生结构上的内力重分布。因而,在石拱桥结构分析中,若不考虑可能出现的裂缝,可以按照无铰拱结构进行计算,但结构内力在某些情况下与实际状况有较大出入。

在进行结构设计时,一般是根据荷载计算截面内力,再进行截面验算,分析是否出现裂缝并根据裂缝对截面和结构考虑内力重分布,然后重新设计计算。但是由于裂缝的不确定性和圬工材料的特点,石拱桥按照这样的方法考虑裂缝的计算分析非常困难。因此一般在石拱桥的设计中,裂缝的出现和内力重分布问题均难以考虑。20世纪70年代左右出现了平铰的概念,从理论上解释了无铰拱拱趾微小转动进入平铰状态后,能使固端弯矩有所放松,因而对温差、混凝土收缩、弹性压缩和支座位移有较好的适应性。将“平铰”概念用于服役石拱桥分析,能较好地解决石拱桥截面开裂后的计算分析,使计算模型和计算结果更接近于实际结构。

平铰相当于一个半径无穷大的铰。与理论铰相比,平铰不能自由转动,即在转动中要受到一定程度的约束。与固定端相比较,平铰不能承受拉应力,截面所能承担的弯矩有限。构造上一般通过在拱圈的拱趾和桥墩的拱座间截面的部分高

度设置平缝，缝中涂抹石蜡、机油或沥青等隔离材料形成。对于使用砂浆砌筑的桥，自然开裂所形成的缝隙也看作是平铰。拱圈截面在外荷载作用下，除了轴力外还存在弯矩作用。弯矩在截面的下缘产生压缩变形  $\delta$  和压应力  $\sigma$ ，上缘产生拉应力，并使截面产生微小转动  $\theta$ 。当上缘产生拉应力超过材料抗拉强度时拱圈上缘开裂，形成平铰。

## 2.2 两平铰拱理论

若石拱桥仅在两拱趾设成平铰，或在外荷载作用下两拱趾截面自然开裂，则拱圈结构为两平铰拱。拱趾截面形成平铰后，拱趾反力与截面压应力的合力相平衡，且偏离截面形心轴。若将拱趾力平移到形心轴，则拱趾除轴力外，还有一个附加约束弯矩。因而平铰拱结构可以看作以双铰拱为基本结构再叠加两拱趾截面的附加约束弯矩对结构的影响。

## 2.3 三平铰拱理论

石拱桥上部腹拱是多跨连续结构，简单采用连续结构进行腹拱分析不能够满足石拱桥的材料抗压不抗拉的特性。而拱上圬工腹拱和拱趾多采用平铰结构，其拱顶受到主拱圈弹性变形影响，容易开裂成缝，因而常利用理论三铰拱进行计算。

两平铰拱是在拱圈的两拱趾设置平铰，而三平铰结构是在两平铰的基础上，在拱顶再加一个平铰。计算图示可以表达为以三铰拱为基本结构，再叠加拱顶约束弯矩和两个拱趾约束弯矩。

## 2.4 石拱桥拱上建筑联合作用理论

对服役石拱桥承载力的评估，若将计算图示由弹性阶段的无铰拱拓展到部分截面开裂进入弹塑性阶段的平铰拱，则承载力评估更为准确，但不足之处是只考虑了主拱圈本身独自工作，实际上拱桥的巨大潜力主要来源于拱上结构与主拱圈的共同受力，在活载作用下拱上建筑参与主拱联合作用，能减少活载内力，提高全拱结构刚度，一定程度上减小主拱圈变形，从而提高活载的通行能力。

腹拱推力是拱式桥拱上建筑联合作用的支柱，现行规范对腹拱为圬工材料的石拱桥没有对应的计算图示，主要在于材料基本不能受拉受拉一侧基本没有作用，

并且立墙较薄抗侧刚度有限，腹拱和立墙一般不是刚结。

### 3 “树驮桥桥驮树” 概况

树驮桥桥驮树，又称三环桥，毗邻江苏与安徽交界处的曹村 206 国道，行政区划属于宿州市墉桥经济开发区，始建于公元一七三六年（乾隆元年）。



图 1. 树驮桥桥驮树北侧情况



图 2. 树驮桥桥驮树南侧情况



图 3. 树驮桥桥驮树整体情况

三环桥结构形式为半圆形三孔厚拱石拱桥，拱圈石块横向交错布置。三环桥跨度不大，桥孔朝向东西方向，中间孔稍大，单孔净跨 5.2m，矢高 2.6m，左右两侧拱净跨 4.8m，矢高 2.4m，拱圈厚 0.3m，桥面宽约 6.4m，桥顶基本平行最南边的石拱，桥拱前也修建有分水墙。三环桥西边修建了一个水坝，阻挡了上游来水，因而桥下的河流已经干涸，基本不受到水的冲力。

三环桥周边环境适宜，有大量灌木杂草等生长。而“树驮桥”中的树是一棵枫杨树，据推断早年树种混杂在石拱桥拱墙后填料的泥土中，因环境条件适合生长而慢慢生根发芽，根系向中间拱和靠西面的拱间的桥墩发展，上部树干横卧贯穿整个石拱桥，从西面石拱延伸至中间拱后，树冠由北侧冲出拱墙，而后向上延伸约五六米，北侧虽未伸出拱墙但肉眼可见树干，拱墙石块被挤出。

本课题主要研究的是在现有条件下石拱桥和枫杨树之间的相互作用关系、石拱桥的安全性以及受力较大已发生破坏的部位，从而为类似的生物与既有建筑共生的结构物的受力分析提供一定的参考。

## 4 “树驮桥桥驮树”有限元模型

### 4.1 石拱桥建模常用模型

石拱桥属于砌体圬工拱桥,过去研究进行有限元建模时一般可以考虑离散模型和连续模型,两种模型采用不同程度的简化,所得到的实际结果也有所不同,但都可以作为有效的参考。

在离散模型中,拱圈作为石拱桥的主要结构被离散为石材,砂浆作为石块间的接触面被模拟为单面摩擦接触单元,其物理特性主要通过试验来获得。其中模拟石材的离散单元可假定具有弹性。这种模拟方法真实地反映了石材的几何尺寸及布置,但是在实际检定结构的承载能力时,现场需要测定的数据较多,最重要的是难以测定拱圈石材在厚度方向的布置,因此在实际中这种模型应用地较少。

而在连续模型中,对结构的机理行为分析采用非线性连续法则,该类又可以分为两小类。

一种方法是将石材和砂浆作为一个整体模拟为一种材料,材料的特性假定为非线性,现行的各种砌体结构规范均采用这种模拟方式,在整体计算时将石材和砂浆看作是单一组合材料,而在危险截面处考虑石材和砂浆二者结合的特性,材料强度综合考虑了两者之间的联系,应用较普遍。

连续模型的另一种方法则是将具有不同材料特性和各向异性的石材和砂浆两种材料进行匀质化,利用匀质化理论得到整体圬工材料平面内的线弹性特性,但是主要分析材料平面内的特性,其平面应力假设并不一定适用于三维结构分析,因此该方法多用于墙体等平面构件分析。这种方法将石材和砂浆完全等价作为一种材料,在实际中应用也并不多。

### 4.2 材料强度准则与本构模型

石料的强度准则表征了石料在极限应力状态和石料强度参数之间的关系。目前岩石力学应用最多的强度理论是 Mohr-Coulomb 准则,基本公式为:

$$\tau \geq \tau_f = c + \tan \varphi$$

Mohr-Coulomb 准则实质上是一种剪应力强度理论,比较全面地反映了岩石

的强度特征，能应用于塑性及脆性岩石的剪切破坏。但是该准则忽略了中间应力的影响，与试验结果有一定出入，不能解释石料在静水压力下也能屈服或破坏的现象。

Druker-Prager 准则是在 Mohr-Coulomb 准则和塑性力学中著名的 Mises 准则基础上发展而来的。基本公式为：

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0$$

Druker-Prager 准则计入了中间应力的影响，考虑了静水压力的作用，克服了 Mohr-Coulomb 准则的缺点，已经在国内外岩石力学与工程的数值计算分析中获得了广泛的应用。由于砌缝的存在，砌体的破坏准则研究比较困难。基于混凝土和石砌体的本构关系很相似，应力应变规律基本相同，力学性能基本相似，利用 ANSYS 软件中的 Solid65 单元分析石拱桥的受力特征。采用混凝土的子选项进行模拟计算分析。

枫杨树采用 Solid185 单元进行模拟，由于其生物特性，与木材力学表现不同，且更为复杂，这里不考虑其各向异性特点。

### 4.3 模型建立

本课题采用通用有限元软件 ANSYS17.0 进行建模。由于外部模型导入容易丢失信息，本文采用 ANSYS Mechanical APDL 内部参数化建模。整个模型主要分为四个部分，分别是三个拱圈、拱墙、墙后填料以及枫杨树，均采用八节点六面体单元，并在计算中考虑材料非线性和结构状态非线性的影响。

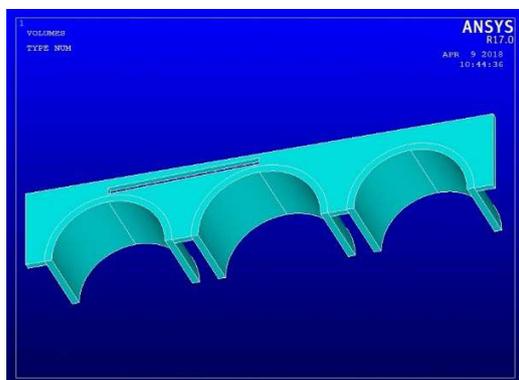


图 4. 拱圈与拱墙有限元模型

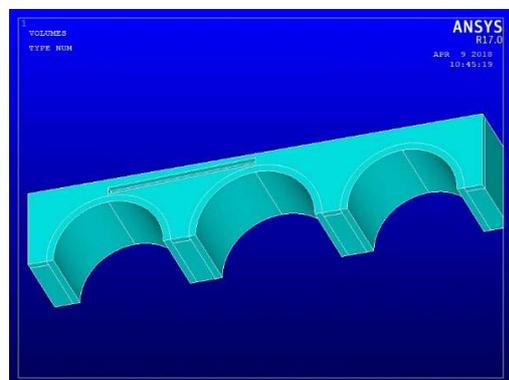


图 5. 增加填料的有限元模型

拱圈、拱墙和墙后填料均按照各自的几何形态直接进行建模，而枫杨树本身

由于结构复杂，需要在建模中进行模型简化。首先是位于拱桥结构内、需要重点考虑的树干部分。值得注意的是，具有生命的树木由于自身细胞生物力学的特征以及内力可以通过细胞内外液体压强的调整进行重分布，可以认为其可以承受荷载而不被破坏。同时，由于树干部分位于拱桥结构内部，无法直接观察得到，因此将此部分树干简化为棱柱；其次是位于拱桥北侧的树冠部分，由于本课题研究不涉及在风中的流体受力分析，仅仅考虑拱桥-树共同体在自重以及桥面荷载静止受力的状态，树冠的形状对结果的影响很小，因此将树冠简化成一个悬臂结构，考虑到其自重的分布形态，将其等效成一个变截面且向外截面逐渐缩小的悬臂结构；最后是树根部分，由于枫杨树的树根错综复杂且大部分位于基础之下无法探得，因此将树干所在的拱桥底面约束所有自由度等效，不再考虑树根的其他作用。由于结构和荷载沿拱桥纵轴线平行，树木虽然不对称，但是其为外部结构，和拱桥自身通过接触单元接触，且等效为对称结构实际上是偏于安全的计算，因而建模仅考虑拱桥纵轴线一侧一半的结构。



图 6. 横卧树干细节

拱圈和拱墙的石材采用的是 Solid65 单元。因为石材的抗压强度远大于抗拉强度，当受到拉力作用时会在砌缝处开裂，结构非线性特性会降低结构的承载能力，因此如果简化为均匀连续体计算会与实际情况有所不符。Solid65 单元是一种

考虑了结构非线性、可表现材料脆性断裂的空间单元,当拉应力超过材料强度后,能够在垂直应力的方向形成弥散性裂缝,并相应降低结构刚度和释放此区域的应力。对于材料本构关系,考虑单轴容许应力和拉应力两个参数,其余参数采用 ANSYS 内部的缺省值。树木不考虑材料的开裂性能,采用 Solid185 单元进行模拟。由于拱圈石材间灰浆都已流失,基本没有抗拉强度,抗拉强度设为小值,用以保证计算稳定性,开裂前按照线弹性材料计算。



图 7. 树根细节

拱背填料对拱桥的结构行为有明显影响,一方面可以通过扩散作用减小作用于拱圈的桥面集中荷载,从而提高整体结构的稳定性,同时又通过与桥台和基础的相互作用提供对拱圈的约束从而直接提高拱圈的受压强度。对于填料的材料特性主要涉及内聚力、内摩擦角和扩散角等三个岩土工程特性值,这三个参数可以较为准确地模拟土壤和碎石的力学性能。实腹式石拱桥结构的承载能力受到这三个参数的显著影响。采用 ANSYS 中的 Drucker-Prager 屈服准则进行模拟。

一般情况下,石料变形均表现出明显的塑性特征,但实际上它既有弹性变形,又有塑性变形,是一种典型的弹塑性材料。工程中一般以 5%为标准进行划分,总应变大于 5%为塑性材料,反之为脆性材料,一般情况下工程中应用的石料均为脆性材料。为反映石材与填料间可以相互滑动但不能传递拉应力的边界条件,

在二者界面处采用空间界面单元，摩擦因数取为 0.2。材料的线弹性模量对计算石拱桥变形及各部分的相互作用影响很大，由于石拱及填料为非均匀不连续材料，很难通过实测的方法直接得到其弹性模量，根据其他文献现场静载试验得到的结果石材和填料的弹性模量取值见下表。

表 1. 构件材料参数

	弹性模量 ( GPa )	抗压强度 ( MPa )	抗拉强度 ( MPa )	密度 ( kN*m <sup>-3</sup> )	泊松比
拱圈	2.15	1.32	0.06	2400	0.3
拱墙	0.41	0.39	0.04	2100	0.3
填料	0.3	-	-	1700	0.3
树木	2000	-	-	120	0.3

不同于其他石拱桥，三环桥由于年代久远，且树驮桥已成为当地的一个景点，桥上已经不允许有车辆经过，因此桥面活荷载不需要按照相关规范根据车辆的轴距和轮距施加于填料

顶面直接采用均布活荷载施加于其上。而桥身和枫杨树自重荷载通过定义材料密度加于模型上。

## 5 计算结果

划分网格时可以看出，由于枫杨树的存在，导致拱墙和填料的几何形态不是基本的几何图形，因而不能使用扫掠的方式进行，只能使用自由网格划分，所以网格的形态并不是很好。

由于材料的非线性特征，有限元计算中常会出现结果不收敛。第一次计算考虑填料的非线性特征，并将石料看作是混凝土进行计算，可以发现不管调整参数还是修改收敛准则，计算在第一次迭代时已不收敛，石料发生不符合非线性材料破坏准则的破坏。

考虑到石料和混凝土之间性质存在差异，不再将石料等效成混凝土，仅考虑填料采用 Druker-Prager 准则，可以看出计算在近一百次迭代后材料发生破坏，结构变形情况如图。

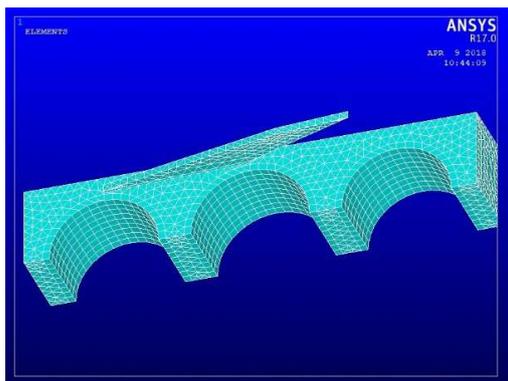


图 8. 网格划分

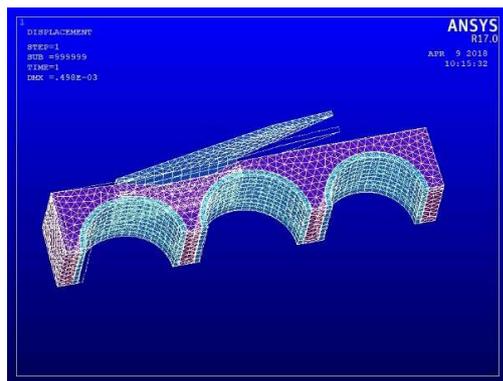


图 9. 非线性分析变形情况

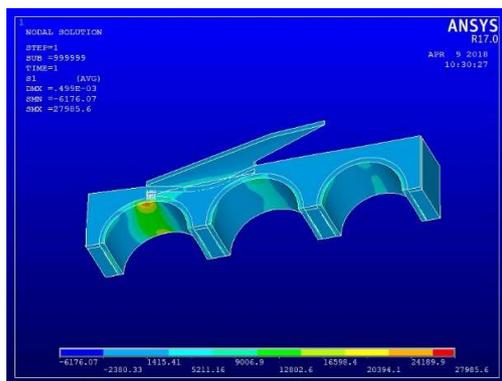


图 10. 非线性分析第一主应力图

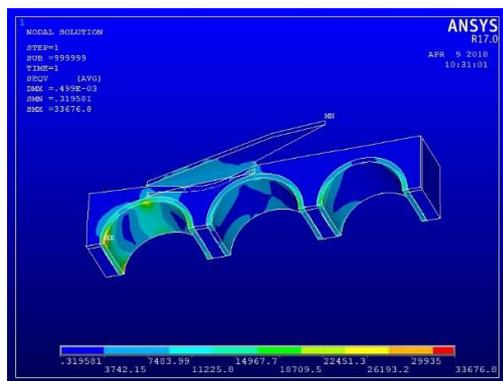


图 11. 非线性分析 Mises 应力图

从结构变形图和应力图可以看出，结构破坏处位于拱桥侧面的枫杨树干下方的拱顶处，因为此处截面最小，同时承受拱桥拱顶力以及枫杨树施加的力，因此是最危险截面，同时可以看出，变形最大的部分是位于桥墩与枫杨树之间的部分，可以认为填料不能够完全抵抗枫杨树施加的荷载，变形情况接近于简支梁受到均布荷载下的挠度变形。

为了便于比较，将所有材料仅考虑弹性再一次进行计算，结果如图。

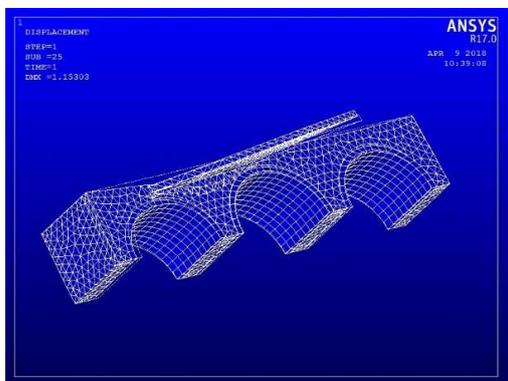


图 12. 弹性分析变形图

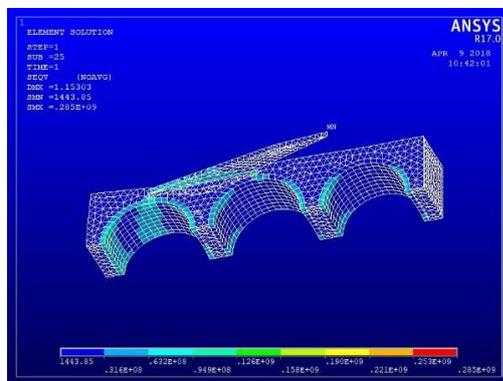


图 13. 弹性分析第一主应力图

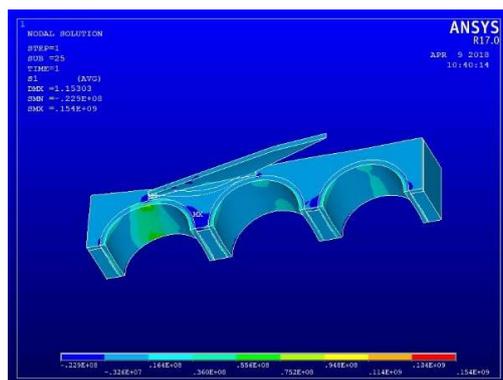


图 14. 弹性分析 Mises 应力图

与考虑了材料非线性的计算结果相比较，可以发现，侧拱拱顶仍然是应力较大的部位，但应力集中的情况并不严重，大应力区域分布范围接近三分之一拱，中间拱应力显著减小。而变形情况两者较为类似，可以看作枫杨树树干简支在两个拱顶。

## 6 分析与总结

从计算中可以发现由于材料的非线性导致计算结果很容易不收敛，而在本课题中，由于枫杨树的存在，模型的几何形态较为复杂，网格划分对计算结果也造成了一定的影响。通过对模型的简化最终得到了计算的结果。由于石拱桥中间拱高于两侧拱，边拱受力明显大于中间拱，枫杨树的存在导致填料连续性介质被打断，材料介质的不连续界面引起应力集中，造成破坏，在实际情况中由于树干的挤压，树干周围拱墙的料石被挤出导致承载能力下降，因此发生破坏可能性将更大。

由于模型的简化以及计算参数未经实验验证，结果可能与实际不太相符，后续的研究可以从以下情况进行考虑：首先考虑树干模型的进一步细化对计算结果的影响，可以通过树木生长模型对树木形态进行仿真，然后通过外部建模软件将模型导入有限元计算软件进行计算；另外由于枫杨树树根庞杂，实质上树驮桥一部分需要的力来自于地下树根的托承，可以对地下树根分布情况进行调查，更细化树根在承载中所起到的作用；同时对材料的非线性特征进行研究，将石料单纯看作是混凝土实际上仍会导致很多误差，考虑对石料本构模型的研究和石料和填料间的相互关系进行改进。

“树驮桥桥驮树”作为一个大自然与人工共同创造的奇观实质上展现了大自然的力量，同时也给我们对结构物的受力性态有了新的理解，生物力学的内涵十分丰富，完全可以从其中提炼精华应用到结构设计中，为仿生结构在建筑结构领域的应用提供更多的参考。

## 致 谢

感谢茅以升基金会绍兴古桥研究中心秘书长罗关洲先生的推荐和鼓励，使得我们鼓足勇气公开这些不成熟的研究成果，呼吁社会各界支持偏远地区古桥的保护。

## 参考文献

- [1] 聂建国, 樊健生. 700 年石拱桥的静力加载试验与结构分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003,43(6):841-843.
- [2] 刘秀岭. 实腹式石拱桥承载能力计算方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- [3] 吴贻军. 风雪灾害下树木断裂机制及风险评估与防护[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- [4] 中华人民共和国交通部. JTJ022-85. 公路砖石及混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社,1985.
- [5] Ng K H, Fairfield C A, Sibbald A. Finite-element analysis of masonry arch bridges[J]. Proc ICE,1999,134(2):119-127.
- [6] Pradipta Banerji, Sanjay Chikermane. Condition assessment of a heritage arch bridge using a novel model updation technique[J]. Civil Struct Health Monit 2012(2):1-16.
- [7] 赵应江, 严仁军, 柯军等. 不同填料对石拱桥受力性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015,39(3):569-572.
- [8] 胡柏学, 周建庭, 徐海燕等.石拱桥安全评估与加固改造技术[M]. 北京:人民交通出版社,2012.

# 悠悠大运河 风雨拱宸桥

张雷

(中国铁路设计集团有限公司 土建工程设计研究院, 天津 300308)

拱宸桥位于杭州市拱墅区, 横跨京杭大运河, 是杭州古桥中最高最长的石拱桥, 也是大运河南端的标志建筑。拱宸桥所处的特殊空间位置, 决定了它不仅仅是一座连系交通的桥梁, 还承载了数百年的历史、文化与情感记忆。



图 1 杭州拱宸桥

## 1 悠悠运河

京杭大运河南起杭州, 北至北京, 途经今浙江、江苏、山东、河北四省及天津、北京两市, 贯通钱塘江、长江、淮河、黄河、海河五大水系, 全长约 1794 公里, 开凿至今已有 2500 多年的历史, 是目前世界上里程最长、工程最大的古代运河, 是中国古代最伟大的工程之一, 2014 年被列为世界文化遗产。

京杭大运河最初开掘于春秋时期, 当时是为了军事目的。公元前 486 年, 吴王欲北上攻齐称霸中原, 下令挖通全长 150 公里的邗沟, 这是世界上有文字记载的最早的人工河道。隋朝统一天下后, 为了沟通南北经济、加强对南方的管理, 十分重视运河的开凿与利用, 对运河大幅扩修, 形成了以洛阳为起点, 以杭州和北京为南北终点, 全长 2700 公里的南北运河。运河的主要目的转为以经济、政

治为主。真正意义上的大运河是在元朝形成的，元朝整修运河时弃洛阳而取直至北京。公元 1293 年大运河全线贯通，全长 1794 公里，史称京杭大运河，北方端点在元大都（今北京）积水潭码头，南方的端点就是杭州拱宸桥，漕船可由杭州直达北京。明、清两代的京杭大运河成为南北水运干线。我国隋、唐、宋、元、明、清历朝，建都在北方的中央政府都需要江南地区的漕粮供应，大运河在一定程度上，承载着一个庞大的漕运帝国，对中央政权的稳定起到了关键作用。



图 2 京杭大运河

京杭大运河作为古代南北交通要道，商运繁盛，沿两岸兴起数十座商业城镇。马可波罗在其游记中记载了他沿京杭大运河南行的见闻，运河沿岸诸城镇都能从他的游记中找到赞美。大运河对中国南北地区之间的经济、文化发展与交流，特别是对沿线地区经济发展作出了巨大贡献，至今仍在发挥着巨大作用，其价值无法估量。

京杭大运河展现了中国古代水利航运工程的高超技术与卓越成就，孕育了众多繁华璀璨的古镇名城，留下了丰富的历史遗存，积淀了深厚的文化底蕴，是先人留给我们的珍贵的物质文化遗产，是代表中华民族文化与精神的象征之一。



图3 “京杭大运河南端” 石碑

## 2 古桥沧桑

京杭大运河南端的拱宸桥始建于明崇祯四年（1631年），初为木桩基础的三孔薄墩联拱驼峰桥，由当时的举人祝华封募资建造。“拱”本义为两手在胸前相合，有恭敬、环绕之意；“宸”指北辰所在、星天之枢，后借指帝王所居，又引申为王位、帝王的代称。《论语·为政》曰：“为政以德，譬如北辰，居其所而众星共（同拱）之”，拱宸桥之名由此而来，寓意百姓拥戴实行德政的皇帝。

清顺治八年（1651年），该桥曾一度坍塌。康熙五十三年（1714年），浙江布政使段志熙倡率捐筑修桥，云林寺僧慧轸募助，历时三年，于康熙五十六年（1717年）十二月竣工，桥长三十四丈，高四丈八尺。清代文人章藻功在《拱宸桥记》中阐明了修建拱宸桥的重要意义：“漕艘之所出入，百货有贾民船之所来往，风起冲击，势之险也。术家又言，省会地气，向东南而趋西北，直泻不留，不可不由以所镇之相。厥地形为扼要处所，则拱宸桥以宜亟建也。”

雍正四年（1726年），右副都御史李伟率属捐俸重修，将桥加厚二尺，加宽二尺，并作《重建拱宸桥碑记》。咸丰十年（1860年），太平军在桥心筑堡垒驻扎。同治二年（1863年）秋，左宗棠率兵攻垒，战火洗劫后，桥梁损毁严重，后于光绪间坍塌。光绪十一年（1885年），杭州人丁丙主持重建三孔石桥，即今见之拱宸桥。此次重建竣工之际，王麟书作《重建拱宸桥记》，细载此桥“桥长二十一

丈四尺，广一丈三尺，桥下三洞，中洞广四丈六尺，左右洞广二丈六尺。”

中日甲午战争后，签订了丧权辱国的《中日马关条约》，杭州被列为通商口岸，拱宸桥地区沦为日租借，并在拱宸桥头航运之口设立海关，称为“洋关”。光绪二十三年（1897年），日军在桥面中间铺筑2.5米宽的混凝土斜面，以通汽车和人力车。直至抗战胜利后，洋关废除。

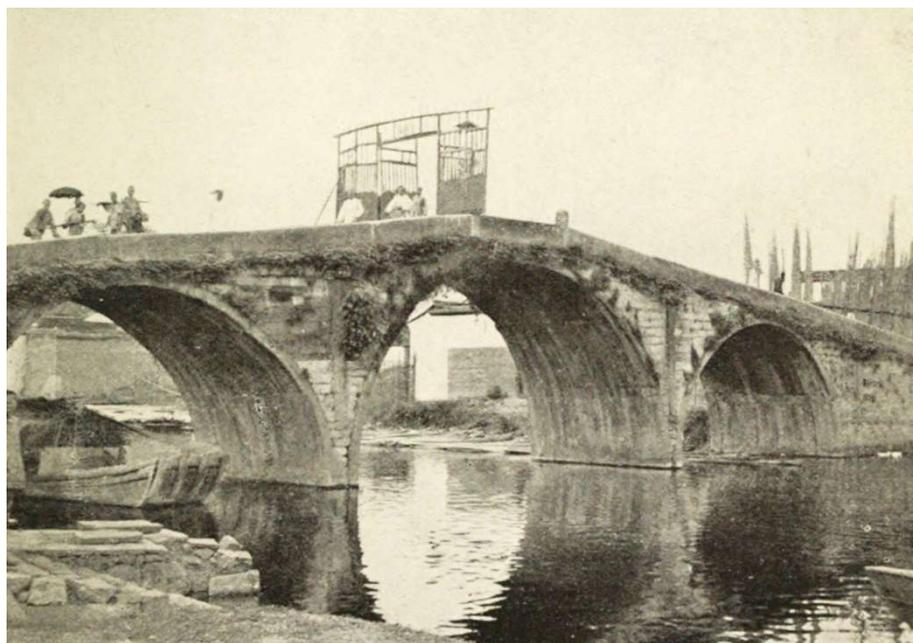


图4 清末拱宸桥

“一座拱宸桥，半部杭州史”，拱宸桥对于杭州不仅仅是一座连系交通的石桥，还承载着特别的记忆与情感。作为杭州水路的“北大门”，当年康熙、乾隆南巡就是从拱宸桥进入杭州；这里曾是漕运往来的交通要道和繁华商埠，络绎不绝的商船满载着江南的富庶从这里一路北上；这里是杭州人情感的重要坐标，桥的里面是家和根，外面则是一片闯荡的天地，石桥承载了多少离乡闯荡的踌躇与离别，和归来游子的兴奋与辛酸；这里曾是杭州茶楼最为云集之处，沿运河往来的三教九流多在此停留歇息；这里是杭州戏院最集中的地方，杭州的第一部电影就是在桥边的茶楼里放映的；这里浓缩了近现代民族工商业史，麻纺印染业、仓储运输业、造船业等在这里萌生和发展，杭州的第一条铁路、第一个火车站、第一个邮局、第一家报社，都开在这里。

新中国成立后，加强了对拱宸桥的保护。1986年，拱宸桥被确定为杭州市文物保护单位。2005年进而被确定为省级文物保护单位。同年，杭州市政府对拱宸

桥进行全面修缮，以修旧如旧的原则，保留了拱宸桥巍峨雄伟、古朴沧桑的历史景观。此次修缮拆除了后期铺设桥面的各类管线；去掉原桥面上 2 米多宽的混凝土桥坡，改设 1 米宽的石板坡；修复栏板和 48 根望柱，柱头重置仰莲、俯莲等雕饰，并在拱壁顶部重塑双龙戏珠浮雕；于主孔墩侧设置四个防撞墩以护桥；2006 年建碑亭。修缮后的拱宸桥，以更加坚强的身躯雄卧运河。

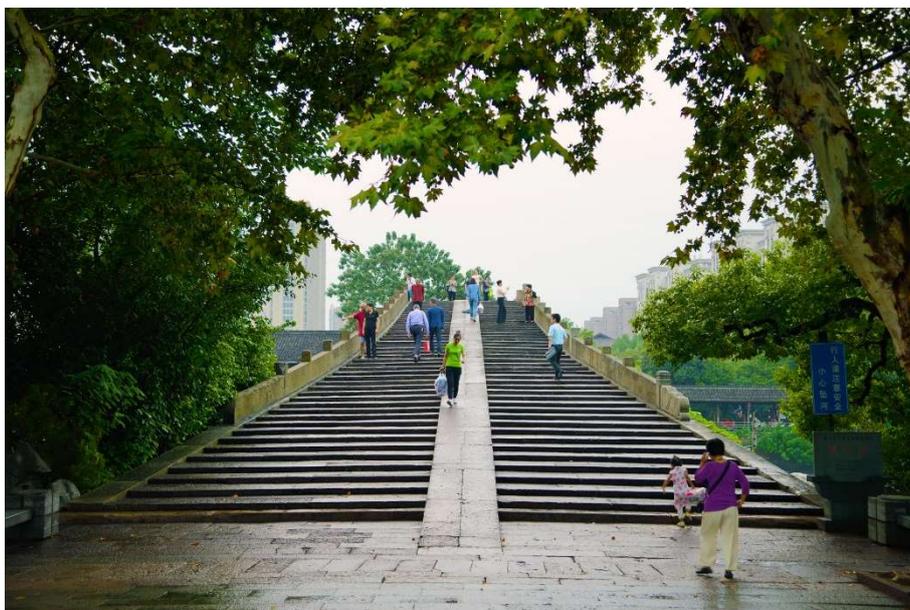


图 5 桥面



图 6 栏板及望柱



图 7 防撞墩及蚣蝮

### 3 技术特色

现存拱宸桥是一座三孔薄墩联拱石桥，是杭州古桥中最高最长的石拱桥。桥长 92 米，中孔跨径 16.5 米，边孔跨径 11.9 米；桥身用条石错缝砌筑，上贯穿长锁石；桥墩自下至上逐级收分，中墩厚约 1m；拱券石厚 30 厘米，用条石纵联并列，分节砌筑，眉石厚 20 厘米；桥面外缘的水平投影呈柔和弧形，中段略窄，宽有 5.9 米，桥堍处宽 12.2 米；桥面两侧以素面石栏围护，中刻“拱宸桥”三字；栏板间立 48 根望柱，柱头多饰仰莲。由于桥下运河航运繁忙，为避免船撞，于主孔上、下游共设置四个防撞墩，每个防撞墩上均雕有避水神兽，名为蚣蝮——中国古代神话中龙生九子之一。所雕神兽形态慵懒，生动可爱。桥东端北侧建有八角重檐桥亭一座，内立八角形石碑，碑面刻有《拱宸桥修建记》。



图 8 桥头碑亭

拱宸桥不仅造型巍峨雄浑、古朴优美，而且展现出中国古代高超的造桥技术。

我国古代南方石桥很多为薄墩薄拱式石拱桥，一则由于长江下游冲积平原土质松软，基础不易坚实，要求拱桥轻巧，减轻自重，降低基础负担；二则桥址往往距离石场较远，采用薄墩薄拱式拱桥可节约材料；三则薄墩薄拱具有一定柔度，能适应少量的不均匀沉陷，对松软土质适应性较好；此外由于江南水网贯通，航运发达，桥下净空要求较高，驼峰高耸的拱桥有利于通航。我国薄墩薄拱技术起

始较早，国外一直到 18 世纪才有薄墩拱桥的建造。

拱宸桥所采用的多孔薄墩联拱结构是中国古代石拱桥的又一成就。这种拱桥当一孔的拱券上承受载荷，就会牵动两边桥墩产生变形，从而把力和变形传到相邻拱，各拱之间相互的推力可以平衡，以节约材料。

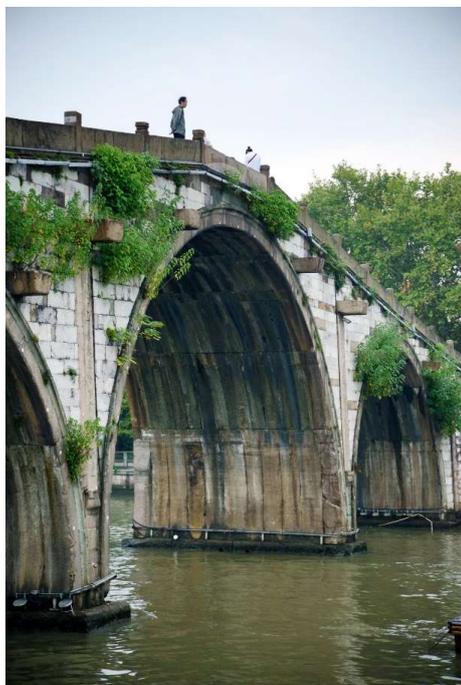


图 9 拱券



图 10 桥碑

## 4 结语

清末杭州藏书家丁丙曾有诗云：“卅丈环桥首拱宸，追怀摸石动酸呻。叮咛去楫来桡客，慎守金缄效吉人。”表达了古桥追怀的文人情愫。杭州还有句老话：“城隍山上看火烧，拱宸桥头乘风凉”，道出了老百姓对拱宸桥的喜爱。当我漫步在拱宸桥上，身旁的往来行人或是安步以渡，或是驻足赏景；桥下的悠悠运河，波澜不惊，直通浩渺。夜幕降临，华灯初上，拱宸桥在灯光的映射下玲珑剔透，韵味尽显。此情此景，未免令人生出许多感怀。拱宸桥经风雨数百年，阅尽沧桑，有运河商贸交通的繁华，有太平天国的战火，有民族工商的萌发，有离客归人的悲欢，有恭迎御架的荣光，也有日据时期的屈辱。如今的拱宸桥，铅华洗尽，雄风依旧，以坦荡坚实的身躯，继续造福于当地百姓。



图 11 游人如织



图 12 拱宸桥夜色

# 杖国之年，赤子之心 ——记古桥摄影家吴礼冠先生

张雷

(中国铁路设计集团有限公司 土建工程设计研究院, 天津 300308)

初闻吴礼冠先生，是通过一本书——《图像中国古代桥梁》。这是一本拍摄精美、制作精良的中国古桥图集，由吴礼冠先生著，唐寰澄先生与葛红兵先生作序。书中以极为丰富的实拍图片和详实的文字记录，全景式展现出中国古桥之美。对于热爱古桥摄影与研究的我而言，非常喜欢这本书，也对本书的作者产生了浓厚的兴趣。

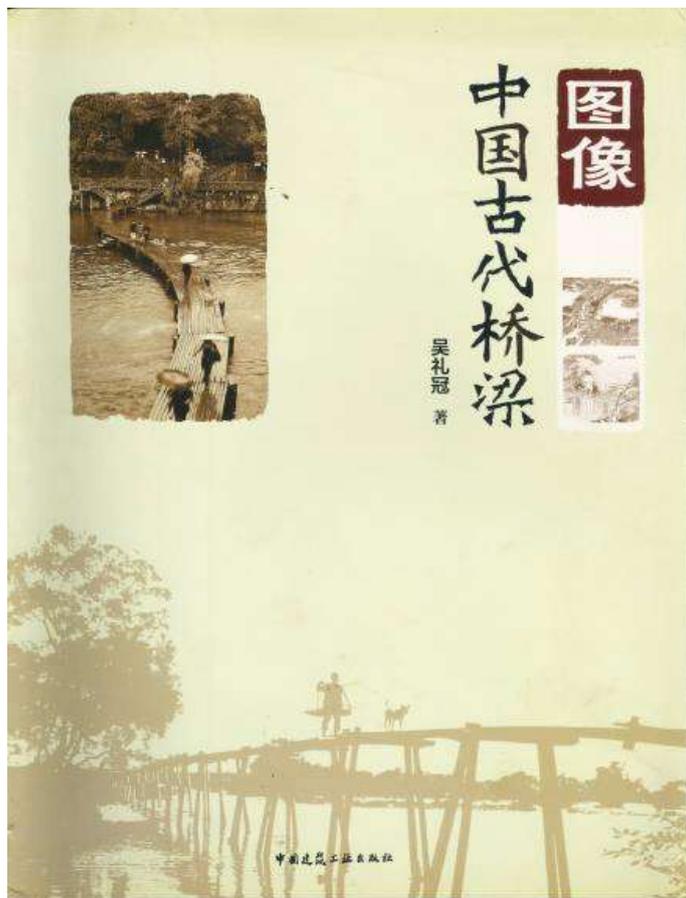


图1 吴礼冠先生著《图像中国古代桥梁》

从网上了解到，吴先生与共和国同龄，祖籍广东清远，十四年前开始全面系统地调查和拍摄中国古桥，行程近 20 万公里，拍摄古桥 600 多座、12000 多幅

照片。这对于一位老年人而言，真可谓壮举！2011年，凝聚了吴先生心血的力作《图像中国古代桥梁》出版问世。2015年，在北京中华世纪坛举办了吴先生的“古桥追梦——一个人与五百座古桥摄影展”。吴先生以愚公移山、玄奘西行的忘我精神，为我们以及后人们留存了大量珍贵的中国古桥图像，其精神和伟绩着实令人敬佩！



图2 吴礼冠先生在中华世纪坛的古桥摄影展



图3 吴礼冠先生与茅以升基金会理事长茅玉麟女士

另一次与吴先生未经谋面的接触，是在茅以升基金会举办的第二届古桥摄影展，这次影展的投稿、评比、展出等，全在网上进行。我投了多幅作品，有赖评委厚爱，获得了一等奖、三等奖、网络人气奖等多个奖项，其中《杭州拱宸桥》作品得到吴先生的推荐评语。作为古桥摄影爱好者，能得到心目中的偶像、古桥摄影大家的肯定，感到莫大的鼓励。



《杭州拱宸桥》

### 评委评语

“

图片以较大比例水面做前景，烘托横跨运河之上的拱宸桥的雄姿。以平视的镜头，拍出高高的石拱桥，象征着对运河北方起点在北京住着的帝王的深深敬意。图片整洁，比例均匀。

—— 吴礼冠

图4 吴礼冠先生对笔者参赛作品的评语

第一次见到吴先生本人，是2019年在中南大学召开的第八届茅以升基金会古桥研究与保护委员会年会上。因为此前见过先生照片，所以一眼就认了出来。先生中等身材，瘦而硬朗，目光炯炯，精神矍铄，正与其他几位学者攀谈。那是我第一次参加年会，尚是籍籍无名的新人，先生自然是不认识我的，故未敢贸然

拜见。当日集体考察长沙周边古桥，但见先生神情专注，仔细研究，有时还掏出随身携带的卷尺测量尺寸。考察途中，我找机会向先生简要作了自我介绍，表达了对先生深深的景仰之情。先生平易近人，随和健谈。得知先生年轻时曾是铁道兵，参与过襄渝铁路的建设，这让在铁路设计院工作的我，感觉和先生更亲近了一层。



图5 吴礼冠先生在年会期间考察长沙大江石桥

次日是古桥委的学术会议，中午就餐的食堂大约有一二里地的距离。天气很好，风和日丽，初冬的寒意全无。吴先生、唐浩先生和我结伴步行前往。唐浩先生是我国著名桥梁专家唐寰澄先生之子，秉承父志研究古桥，造诣颇深，也是我景仰的前辈。往返途中，三人一边聊天，一边漫步在美丽的校园，当然，更多是两位先生闲聊，我大多时候在聆听，偶尔参与几句。原以为先生一心扑在事业上，家中事务想必是无暇顾及的，聊天中才得知，先生在家时，每日买菜做饭，大小事务，勤快地很呢！这让唐先生和我都颇感意外，也使我不禁心生感慨：即使如先生这样有大建树者，依然是柴米油盐，大隐于平凡的生活之中；另一方面，身处人间烟火、生活琐事的平凡人，只要以赤子之心追寻初衷，照样能成就一番事业！和先生聊得很投缘，先生说要送我一本新著，我既高兴又感激。



图6 吴礼冠先生与笔者在中南大学合影

当日晚，来到先生房间，先生将新著《匠心桥饰——图像中国古代桥梁装饰艺术》赠送于我。这是先生继《图像中国古代桥梁》之后的又一力作，以极为丰富的第一手摄影作品，分门别类、全面系统地展示和阐述了中国古代桥梁的装饰艺术，图文并茂，极具学术和艺术价值。先生对书中照片如数家珍，每当我的目光停留在某幅作品时，先生都能清晰地回忆起拍摄照片时的情景。我很珍惜这次和先生交谈的时光，听先生讲述了很多他的经历、他的故事、他的摄影经验。

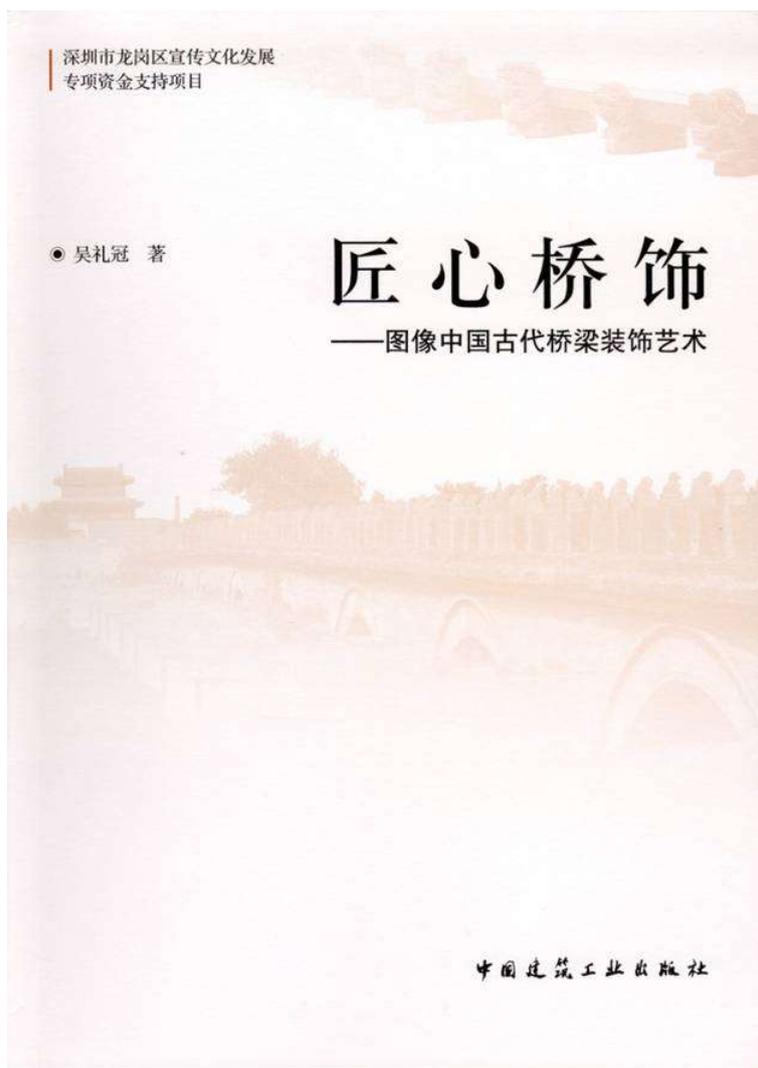


图7 吴礼冠先生著《匠心桥饰——图像中国古代桥梁装饰艺术》

先生阅历丰富，年轻时当过铁道兵，也在政府部门做过摄影、宣传等工作。由于对中华传统文化由衷热爱，萌生了拍摄记录各地古民居的想法并付诸实践，著有《中国古民居》一书。在拍摄古民居时，逐渐被中国古桥的魅力所折服，从2005年开始，专门拍摄散落在全国各地的中国古桥。每次拍摄几乎都是单枪匹马，深入全国各地，遍访存世古桥。很多拍摄过程极为艰辛，遇人烟稀少、车不能至之地，还要背着沉重的器材，忍饥挨饿长途跋涉。这样的艰苦，即使对于年轻人也实属不易，何况一位老者。

先生付出这些辛苦，不图名利，只是为了把这些宝贵的中国古桥，以图像资料的形式得以保存和流传，让世人能够全面地目睹中国古桥之芳容，感怀中华文化之魅力。先生言道：“我们中国人不研究中国文化，让谁来研究呢？只有我们

中国人，才能最地道地研究中国文化！”这种中华儿女的使命感，令我油然而敬。先生深知，很多古桥命运并不乐观，随时有自然损毁或被拆除的可能，所以先生一直以时不我待的紧迫感，和舍我其谁的责任感，尽可能早地、尽可能多地拍摄古桥。先生谈起近来正在筹备的工作，是上海电视台将要以先生为主人公拍摄一部纪录片，以古桥为链，讲述各地风土人情、文化传承。在弘扬中国古桥文化的道路上，先生可谓老骥伏枥，壮心未已。

其间我还特地询问了先生拍摄古桥的器材情况，先生指着房间一角的摄影包和三脚架介绍，拍摄古桥时一般携带两台 Canon 5D Mark II 机身和三支不同焦段的镜头，以及一个曼富图三脚架。外出时这些器材总是随身带着，这次参加年会也带来了，还打算要拍摄一些湖南古桥呢。作为摄影爱好者，我知道这些器材的分量，先生总是随身负重这么多，让我这个年轻人既敬佩，又为自己感到汗颜。

与新中国同岁的先生，今年已步入杖国之年。在短短两天的接触中，我总能感到先生对于年轻人深切的期望之情，毕竟中国古桥事业，乃至中华文化的传承，落实到底是要靠一代又一代具体的中国人。先生总是鼓励我，希望我们这些在先生眼中还算年轻的人，能够不负时光，好好地研究和保护中国古桥，将中国古桥文化发扬光大。

杖国之年，赤子之心，楷模已立，后辈必将自强……