

# 桥梁模型试验在宋金时期浮桥建造中的应用

张 杨

(河北大学 宋史研究中心, 河北 保定 071002)

**摘 要:** 为了探讨宋金时期中国桥梁建筑技术, 分析了桥梁模型试验在宋金时期浮桥建造中的应用。分析认为, 北宋采石浮桥的建造已经出现了足尺模型, 金初的蒲津渡浮桥更是实现了足尺模型向缩尺模型转换的关键过渡, 而南宋时的中津浮桥系统地运用了现代桥梁模型试验的诸多理论。

**关键词:** 桥梁模型试验; 采石浮桥; 蒲津渡浮桥; 中津浮桥

**中图分类号:** G322 9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-6248(2010)02-0039-04

中国宋金时期桥梁建设方面取得了令现代人都震撼不已的成就。中国古代的“四大名桥”中, 除了赵州桥始建于隋代以外, 洛阳桥、卢沟桥和广济桥都相继建造于宋金时期。宋仁宗嘉祐四年(1059)建成的洛阳桥, 是中国第一座濒临海湾的大石梁桥, 洛阳桥首创了筏型基础以立桥墩、养殖牡蛎以固桥基、舟船浮运以架梁体的施工工艺<sup>[1]</sup>; 金章宗明昌三年(1192)建成的卢沟桥, 展示了施工技术与工艺美术的完美结合, 被13世纪的意大利旅行家马可·波罗盛誉为“各处桥梁之美鲜有及之者”<sup>[2]</sup>; 宋理宗宝庆二年(1226)竣工的广济桥, 是一座“浮桥和梁桥结合”<sup>[3]</sup>的新型组合式桥梁。除此之外, 宋金时期在中国的桥梁建筑史上举世闻名的桥梁还有安平桥和虎渡桥<sup>[4]</sup>。

以上这些享誉世界桥梁建筑史的丰碑之作向世人展示了宋金时期中国桥梁建筑的灿烂辉煌, 然而这些桥梁都是梁式或拱式结构。其实宋金时期浮桥的建造技术已经大为发展, 然而之所以影响力较小, 一是因为浮桥结构比较简单, 多以舟船为桥梁承载载体, 上面再覆以木质桥面; 二是绝大多数浮桥的木质材料决定其很难长久使用, 往往在长年累月的河水浸泡下腐蚀损坏或者毁于战火。然而, 这一时期

浮桥的建造在桥梁工程技术上有了重大突破, 即在正式建桥前能够按照设计要求先期进行模型试验。但是这一变革并没有引起今人的足够重视。现代桥梁模型理论中的“模型”是指“仿照原型结构按一定相似关系复制而成的代表物, 它具有原型结构的全部或主要特征”<sup>[5]</sup>。在当代桥梁建筑工程领域, 桥梁模型试验的作用举足轻重, 这是因为模型与实物比起来具有尺寸小、构造简单、加工方便、耗费少等诸多优点, 可以直接验证实物的可行性、不同建筑方案的经济性以及实物外观的艺术性。随着模型试验理论的逐步完善, 模型试验几乎已经涵盖了桥梁建筑工程所属的各个分支, 并成为其中必不可少的重要一环。鉴于此, 很有必要对宋金时期浮桥建造中桥梁模型试验的理论与实践进行研究和探讨。

## 一、北宋在长江采石浮桥建造中的桥梁模型试验

早在北宋以前中国就有为军事战略而在江河上架设浮桥的先例。如隋炀帝大业八年(612)第一次亲征高丽时, 时任工部尚书的宇文恺曾在辽水上架设浮桥, 结果是计算失误导致浮桥长度不够, “及

收稿日期: 2010-01-08

作者简介: 张 杨(1981-), 男, 满族, 河北兴隆人, 历史学硕士研究生。

济,桥未成,去东岸尚数丈,贼大至”<sup>[6]</sup>,导致后军不能持续登岸,致使先行上岸的右屯卫大将军麦铁杖力战身死。所以要成功架设浮桥,精准的测量和计算是不可或缺的。

北宋建国之初,宋太祖为统一全国,于开宝七年(974)发动了攻灭南唐的战争,南唐李氏政权据江为险,故如何精准地架桥渡江成了宋军能否取胜的关键因素。当时为宋军完成这项重要军事工程的人是樊知古<sup>①</sup>。史书记载:

知古尝举进士不第,遂谋北归。乃渔钓采石江上数月,乘小舟载丝绳,维南岸,疾棹抵北岸,以度江之广狭。开宝三年,诣阙上书,言江南可取状,以求进用<sup>[7]</sup>。

其方法就是建造浮桥渡江。笔者通过下面两例史料拟再现采石浮桥的建造过程。

#### (1)《宋史》中《樊知古传》的记载:

方议南征,命高品石全振往湖南造黄黑龙船,以大舰载巨竹,自荆南而下,遣八作使郝守濬等率一营之。议者以谓江涛险壮,恐不能就,乃于石牌口试造之,移至采石,三日桥成,不差尺寸,从知古之请也<sup>[7]</sup>。

#### (2)《宋史》中《南唐李氏传》的记载:

江南进士樊若水诣阙献策,请造浮梁以济师。太祖遣高品石全振往荆湖造黄黑龙船数千艘,又以大舰载巨竹,自荆渚而下。及命曹彬等出师,乃遣八作使郝守濬等率一营之。议者以为古未有作浮梁渡大江者,恐不能就。乃先试于石牌口,移置采石,三日而成,渡江若履平地。煜初闻朝廷作浮梁,语其臣张洎,洎对曰:“载籍已来,长江无为梁之事。”煜曰:“吾亦以为儿戏耳”<sup>[7]</sup>。

由上述史料可以了解采石浮桥完整的建造过程:樊知古向宋太祖提出架设浮桥渡江作战的策略;石全振奉旨前往荆湖督造数千艘黄黑龙船;郝守濬以大舰搭载巨大的竹绳,并同造好的数千艘黄黑龙船沿江向采石进发;由于缺乏跨江建造浮桥的经验,故先在石牌口进行架设试验;宋军将架设好的浮桥由石牌口移至采石,三日而成,不差尺寸,遂渡江。

从以上史料还可以看出,采石浮桥的主要构造物是“黄黑龙船数千艘”与“巨竹”,其作用又如何呢?陆游在《入蜀记》中记载:

初,若冰不得志于李氏,诈祝发为僧,庐于采石山,凿石为窍,及建石浮屠,又月夜系绳于浮屠,棹小舟急渡,引绳至江北,以度江面<sup>[8]</sup>。

王曾瑜先生曾经对这一史料进行了分析,并对宋代浮桥两船之间的距离作了详细考证,最后得出结论:采石浮桥须用船 773~967艘,“黄黑龙船”正是构成浮桥的主要承载体,“巨竹”的用途是一头拴在岸边事先凿好的石浮屠上,另一头拴在龙船上以维系浮桥稳定<sup>[9]</sup>。由此可以认定,在石牌口试验中已经拼装完成的只是“黄黑龙船数千艘”中的一部分,长度正好符合采石江面宽度的需要,而这个宽度要求是樊知古经过反复测量获取的。

通过对模型试验理论的研究可以认为,采石浮桥的建造表明这一时期桥梁模型试验已经初步形成。支撑这一观点的理由有三:第一,石牌口试验中的这座浮桥“不差尺寸”,具有实际结构的全部特征,尽管它不是按比例缩放的代表物(模型),而是最终的采石浮桥,但是它已经融入了大量的测量数据,成功地验证了其在采石矶架设的可行性;第二,“不差尺寸”的比例已经在一定程度上与现代桥梁模型理论中的“足尺模型”<sup>②</sup>相似;第三,尽管这次试验更像是现代钢桥的试拼装过程,但是显然古人已经具备了在没有建桥施工经验的情况下先期进行试验的思想。李煜与张洎的对话不仅凸显了宋军的出奇制胜,还反映了当时跨江为梁的巨大难度,说明了石牌口桥梁模型试验成功的重大意义。

今人对北宋末年出版的《营造法式》研究后发现,至迟在北宋末,房屋建筑领域已经系统地出现了建筑模数理论<sup>[10]</sup>;而在桥梁建造领域,开始由“足尺模型(1:1)”向“缩尺模型”<sup>③</sup>过渡,同样是桥梁模型试验发展的必然历程。

## 二、金在黄河蒲津渡浮桥建造中的模型试验

金正隆四年(1159),为了运输关中地区的木材以营建当时的南京,完颜亮决定在黄河上的蒲津渡架设浮桥,负责此项工程的是曾于关中青峰山“起长桥十数里”<sup>[11]</sup>的彰德军节度使张中彦。据《金史》记载:

① 关于其本名,说法不一。一说为若冰,“知古旧名若冰,太祖以其声近‘弱兵’之仄,故改之”,参见文莹《玉壶清话》卷8,中华书局,1984年。另一说为若水,“知古本名若水,字叔清,因召见,上问之曰:‘卿名出何书?’对曰:‘唐尚书右丞倪若水亮直,臣窃慕之’。上笑曰:‘可改名知古’。知古顿首奉诏。”参见脱脱《宋史》卷276《樊知古传》,中华书局,1977年。

② 足尺模型即以原物大小按1:1比例制成的模型。

③ 缩尺模型即以原物大小按一定比例缩小而成的模型。

舟之始制,匠者未得其法,中彦手制小舟才数寸许,不假胶漆而首尾自相钩带,谓之鼓子卵,诸匠无不骇服,其智巧如此。浮梁巨舰毕功,将发旁郡民曳之就水。中彦召役夫数十人,治地势顺下倾泻于河,取新秫秸密布于地,复以大木限其旁,凌晨督众乘霜滑曳之,殊不劳力而致诸水<sup>[11]</sup>。

从该史料可以清楚地看到,蒲津渡浮桥在建造之前,的确制作了缩尺模型。尽管从文字记载中难以判断缩尺的精确比例,但是这些“数寸许”的小舟,与前述采石浮桥相比,已经完成了由建筑实物向建筑模型的质的跨越,建筑模型完全具备了实体建筑的特点。另外,需要指出的是,这次模型试验已经不仅仅是为了向工匠们示范未来浮桥的建造过程,更是一次对新型施工技术的测试验证。它不再采用胶漆粘连的方法来连接舟船,而是使用“鼓子卵”前后勾带,这应当是一种卵榫结构。以机械装置替代传统工艺的粘合剂,无疑是一项工程技术上的重大突破,这一技术的采用既增加了浮桥整体的平稳性,也保证了浮桥使用过程中的安全性。此外,在浮梁巨舰下水的技术处理上,张中彦独具匠心,沿地势高低铺满秫秸,以大木头在两旁做限规制“滑道”,趁清晨成霜之时使役夫将浮梁舟船沿滑道曳入水中。晨霜与秫秸的结合,不仅大大降低了浮梁舟船下水时的阻力,节省了人力、物力,而且防止了舟船底部由于摩擦可能造成的损坏,有力地保证了浮桥使用的安全性。

### 三、南宋在沿海中津浮桥建造中的模型试验

如果说蒲津渡浮桥的模型试验已经完成了足尺模型向缩尺模型的过渡,那么南宋中津浮桥的建造在此基础上有了长足的发展。中津浮桥建于宋孝宗淳熙八年(1181),主持建造工程的是当时知台州的大学问家唐仲友。唐仲友著述颇多,又曾被朱熹六劾,因而广为人知。其实,他在当时不仅文章学问颇有影响,还是一名杰出的工程师,“博学工文,熟于度数”<sup>[12]</sup>。唐仲友不仅亲自参与了中津桥的规划、试验及建造全过程,还明确记录了中津桥在建造之前的模型试验情况:

分官吏,庀工徒,度高下,量广深,立程度,以寸拟丈,创木样置水池中,节水以籥,效潮进退,观者开喻,然后赋役<sup>[13]</sup>。

这一史料表明这一时期桥梁模型试验已经日趋成熟。

(1)“分官吏,庀工徒”。“分官吏,庀工徒”的含义为合理分工、各司其职、各负其责,有序地展开一项流程。这表明工程项目已经进入整体规划阶段,划分出专职官员进行管理,操作细部施工的工匠也已经各就各位,充分证明了当时中津桥施工工程已经具备了专业化分工的流程。

(2)“度高下,量广深,立程度”。这是施工前的勘测工作,包括实测河岸的高低、河水的深广,以及制定统一的度量衡标准。这项勘测意义重大,因为它是桥梁模型试验的数据来源与理论基础,它的真实可靠性决定了桥梁模型是否可以完整准确地验证实物尺寸,也就决定着中津桥建造的成败。

(3)“以寸拟丈,创木样置水池中”。通过对实地测量数据的分析,确定模型比例为1:100并以木制材料作为模型的主要材料,将制作好的模型放在水池中进行试验。以木制材料为模型的主要材料,是因为最终建成的中津桥是木制浮桥,以相同材料和固定比例尺寸做成的模型,能在最大程度上模仿实物的受力特性,这在现代桥梁模型试验理论中叫做“几何相似准则”。

(4)“节水以籥,效潮进退”。在水池中夹取遮挡物来蓄积水量形成水压力,释压后水对模型形成冲击,以模仿水对实物桥梁的动态冲击力,也就是“效潮进退”现象。这样做的原因是,台州濒临东海,中津桥所跨河流受潮汐影响很大,每日潮汐的涨落能使河面高程相差甚远,并且潮水的进退对桥梁形成了持续变化的冲击力,这就使桥梁除了承受恒载压力之外,还要经常处在海水冲击形成的活载作用之下,所以在模型试验中“效潮进退”是十分必要的,这在现代桥梁模型试验理论中叫做“动力相似准则”。中津桥建成之后,“桥不及岸十六寻,为六筏,维以柱二十,固以榱,筏随潮与桥岸低昂”<sup>[13]</sup>,也就是将浮桥一端固定于河岸一侧,另一端留出距离,采用多孔栈桥来衔接,这样桥面就可以随水位上下而升降,成功验证了此前模型试验中“效潮进退”的必要性和准确性。

(5)“观者开喻,然后赋役”。桥梁模型制作以及试验的整个过程,都是由工匠们现场观摩,其目的就是让他们“开喻”之后再行施工,可见模型试验还起到了示范作用。那么这个“以寸拟丈”的模型到底有多大呢?文献记载中津桥“修八十六丈,广一丈六尺”<sup>[14]</sup>,以一宋丈约为今3.1米计,此桥梁模型

的长约 2.7 米, 宽约 0.5 米, 应该可以详细展现中津桥的细部构造, 完全可以起到准确的示范作用。

从以上分析可以发现, 中津桥模型试验不仅涉及了结构本身受力的相似性, 而且涉及了动力的相似性, 特别是对于潮水冲击力的模拟试验满足了液流相似原理, 这种将结构模型试验和水力学模型试验结合起来模拟桥梁施工和使用过程的思想, 对于现代的桥梁模型试验仍然具有一定的借鉴意义。中津桥模型试验的成功, 不仅满足了多项现代桥梁模型试验理论中的基本准则, 而且完全发挥了在现代被称之为“验证性试验”的作用, 表明这一时期桥梁模型试验的理论与实践在继续发展并已日趋成熟。

## 四、结 语

从采石浮桥的验证性足尺模型, 到蒲津渡浮桥的示范性缩尺模型, 再到验证与示范作用兼而有之并且应用了相似原理的中津浮桥模型, 表明宋金时期中国桥梁模型试验理论与实践的结合已经在浮桥建造过程中得到广泛应用, 这在中国桥梁建筑史上具有划时代的意义。

宋金时期在浮桥建造方面的成就, 一方面是由自然科学技术随着人类社会的发展而不断进步的客观规律所决定的; 另一方面也说明这一时期中国的科学技术已经高度发展, 《营造法式》中所呈现的房屋建筑领域的木制技术和比例模数理论完全过渡到

木制浮桥桥梁模型试验的应用中, 这恰恰是中国古代科技文明在当时已经整体上领先于世界水平的一个缩影。

## 参考文献:

- [1] 茅以升. 中国古桥技术史 [M]. 北京: 北京出版社, 1986
- [2] 马可·波罗. 马可波罗行纪 [M]. 冯承钧, 译. 北京: 中华书局, 2004
- [3] 潘洪萱. 古代桥梁史话 [M]. 北京: 中华书局, 1982
- [4] 潘洪萱. 南宋时期泉州地区的石梁桥 [J]. 自然科学史研究, 1985, 4(4): 345-352
- [5] 朱尔玉, 朱晓伟, 贾英杰, 等. 土木工程结构试验高级教程 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009
- [6] 魏 征. 隋书 [M]. 北京: 中华书局, 1973
- [7] 脱 脱. 宋史 [M]. 北京: 中华书局, 1977
- [8] 陆 游. 入蜀记 [M]. 台北: 文海出版社, 1981
- [9] 王曾瑜. 宋代横跨长江的大浮桥 [J]. 社会科学战线, 1983, 6(4): 141-142
- [10] 杜启明. 宋《营造法式》设计模数与规程论 [J]. 中原文物, 1999, 23(3): 66-77
- [11] 脱 脱. 金史 [M]. 北京: 中华书局, 1975
- [12] 吴子良. 荆溪林下偶谈 [C] // 纪 昀, 等. 景印文渊阁四库全书. 台北: 台湾商务印书馆, 1983
- [13] 唐仲友. 悦斋文钞 [C] // 续修四库全书编委会. 续修四库全书. 上海: 上海古籍出版社, 2002
- [14] 陈耆卿. 嘉定赤城志 [C] // 中华书局编辑部. 宋元方志丛刊本. 北京: 中华书局, 1990

# Application of bridge model test on construction of pontoon bridge in Sung and Jin ( Jurchen) Dynasties

ZHANG Y ang

(Center for Studies of Song History, Hebei University Baoding 071002, Hebei, China)

**Abstract** In order to find the bridge construction techniques in the Sung and Jin ( Jurchen) Dynasties, this paper discusses the bridge model tests at that time. The research results show that the full-scale model were emerged in the construction of Caishi pontoon bridge in the Northern Sung Dynasty, and then the full-scale model of bridge changed into the reduced-scale in the construction of Pujindu pontoon bridge in the early of Jin ( Jurchen) Dynasty. Besides, lots of modern theories about the bridge model test were used in the construction of Zhongjin pontoon bridge in the Southern Sung Dynasty. All these have strongly indicated that the technological level of bridge was developed greatly at that time.

**Key words** the bridge model test; Caishi pontoon bridge; Pujindu pontoon bridge; Zhongjin pontoon bridge