

应该认真查找“豆腐渣”工程设计上的错误

张肇伸

(中国铁道科学研究院 铁道建筑研究所, 北京 100081)

[摘要] 为了探讨綦江虹桥垮塌的原因, 通过对现有结构计算分析程序功能的分析, 论述了对压弯杆件最不利受力状态分析时的遗漏和针对压弯杆件强度及稳定验算方法中存在的错误; 质疑是否存在哑铃形或圆端矩形断面的拱肋抗弯截面模数的计算方法, 指出了钢管混凝土拱桥存在诸多不安全因素; 建议设计工程师放弃片面追求新、奇的设计思想, 转变为注重安全、耐用、适用来设计和建造百年之内决不会垮塌的工程。

[关键词] “豆腐渣”工程; 设计错误; 安全度

[中图分类号] U447; U448 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)11-0008-12

1999年3月26日《北京晚报》报道:“重庆綦江县虹桥是一座连接新旧城区的中承式钢管混凝土人行拱桥, 全长140 m, 主拱净跨120 m, 宽6 m。1999年1月4日18时50分, 大桥突然整体垮塌, 过往于桥上的32名群众和22名列队训练的武警战士顿时坠入河中, 其中40人死亡, 14人受伤。死亡人员中, 武警战士18名, 群众22名, 平均年龄不到30岁, 年龄最小的仅7个月。”^[1]

部队行军每小时能走4 km, 即每秒行进1.11 m。依此计算武警战士以行军速度通过全长140 m的綦江虹桥只需2分零6秒。上述计算表明, 如果綦江虹桥从出现险情到彻底垮塌能超过两分钟, 那么武警战士就可以走过桥去躲过那次劫难, 更不要说武警战士还是跑步过桥呢。

在丹东市鸭绿江边可以看到朝鲜战争被联合国军炸得千创百孔的半座铁路桥。那半座桥现在不要说上去54个人呆几分钟, 就是推上去2节60 t装有货物的车箱放半个月也决不会垮。朝鲜战争之前几千吨的列车可以安全地往来, 朝鲜战争期间遭受联合国军猛烈轰炸炸桥没有垮, 半座废桥铁路部门无需再养护涂漆了, 放了近半个世纪, 桥也没锈垮。如今游人多时超过54个人到那座桥上去参观游玩

甚至蹦蹦跳跳, 游人尽管放心决不会碰上綦江虹桥那样的厄运。然而1999年1月4日仅仅54个人其中还有一位年轻的母亲手中抱着仅7个月的婴儿, 竟然能在两分钟之内将一座全长140 m的特大桥彻底“摧毁”。其能量来自何处?

笔者认为, 綦江虹桥垮塌一定缘于那种钢管混凝土拱桥的致命内因, 人们如不能实事求是地面对綦江虹桥的垮塌内因, 迟早还会有人在那类桥梁上丧命。

1 SAP(91)程序不能计算綦江虹桥的共振现象

“为彻底调查綦江虹桥事故, 重庆市、綦江县专门成立了建设工程调查小组, 现场勘察和知情人士取证小组。此外还由重庆建筑大学等5家单位组成专家组。”^[1]鉴于綦江虹桥事件轰动全国, 老百姓都十分关心虹桥案件的审理情况。中央电视台征得最高法院等单位的同意和支持, 曾进行过2次綦江虹桥案件审理实况直播, 并邀请知名专家进行点评, 认为重庆綦江虹桥垮塌与共振现象无关:“参与事故调查的专家组特地委托交通部重庆公路研究所, 运用目前国内外公认的美国Super SAP(91)MARC动力计算软件进行计算复核后认定: 武警

战士列队在桥上跑步产生的动力效应远小于该桥的设计能力，其动力作用不会引起虹桥共振。因此共振加快虹桥垮塌之说不攻自破。”^[2]

笔者对“与共振现象无关”的结论持怀疑态度：桥梁的垮塌不可能与当时的振动情况无关；也不应将 SAP (91) 直接用于钢管混凝土拱桥的力学分析。对此，笔者查阅了 Super SAP (91) MARC 程序的使用说明，以及 ALGOR FEAS (Super SAP 91 年版) 软件分析计算模块数据文件格式使用手册（以下称“SAP 91 使用手册”）。

“SAP 91 使用手册”在编译者的话里写道：“这里介绍的 ALGOR FEAS (ALGOR finite element analysis system) 是一个在 386/486 微机上使用的综合性有限元软件包。该软件包反映了国际上 90 年代微型计算机图像处理 and CAD 等领域中的最新技术。”^[3]关于结构分析的功能，编译者写道：“它除了具有结构分析的静力、动力、线性、非线性等常用模块以外，还包括了一些特殊功能的模块，如板壳梁系统的屈曲分析，复合材料薄板和厚板的静、动力分析，随机振动响应分析，频率响应分析，间隙元分析等，更重要的是它还包括了稳态和瞬态场的分析（电流、温度场、渗流等），多刚体运动学、动力学与仿真分析，不可压缩粘性流体的流动分析，管道系统 CAD 等模块。”^[3]

表 1 列的是从“SAP 91 使用手册”总计给出的 17 种单元卡目录中选出与本文有关的 9 种单元卡目录如下：

表 1 单元卡目录

Table 1 List of element card

§ 4.1 杆单元卡	10
§ 4.2 梁单元卡	13
§ 4.3 三维空间的平面应力单元卡	29
§ 4.4 二维实体元卡	35
§ 4.5 三维八节点实体元卡	40
§ 4.6 板壳单元卡	45
§ 4.7 边界单元卡	53
§ 4.15 复合材料薄板单元卡	81
§ 4.16 复合材料厚板单元卡	88

图 1 为綦江虹桥侧面图。人们知道，使用结构通用分析程序，例如 SAP (91) 程序最先输入计算机的数据是单元类型数据，否则计算机又如何获知您所分析计算结构物的外形尺寸，结构形式和建造结构物用的材料性质呢？如以图 1 所示的綦江虹桥为例，显而易见，从全桥离散出来的杆 1 至杆 4

可以按表 1 中的 § 4.1 杆单元卡填写输入数据。而从全桥离散出来的板 1 至板 5 可以按表 1 中的 § 4.6 板壳单元卡填写输入数据。然而从全桥离散出来的曲梁 1 至曲梁 5 又该使用何种单元呢？又该按哪一个单元卡填写输入数据呢？也许有人会说可以按表 1 中的 § 4.2 梁单元卡填写输入数据。在“SAP 91 使用手册”的第 13 页的 § 4.2 三维梁单元标题下写着：“在三维空间中，必须用三个节点才能描述梁单元，第三个节点 (K 节点) 用来对梁单元在三维空间中定向”^[3] (见图 2)。从图 2 可见“SAP 91 使用手册”中的 § 4.2 梁单元是三维空间均质材料的直梁单元。如依 § 4.2 梁单元卡填写输入数据，其计算结果有如将图 1 中的点 0 和点 1，点 1 和点 2……点 4 和点 5 联接起来，那样计算的桥有如架在珠江上的折线桥，而不是綦江虹桥那样的拱桥。此外“SAP 91 使用手册”的第 14 页在“梁单元材料特性数据卡”填写说明中规定要填写单元使用材料的弹性模量 EN、泊松比 GN、质量密度 RON、重量密度 WGTN、单元局部坐标轴 1 方向的热胀系数 THERM (N, 1)、单元局部坐标轴 2 方向的热胀系数 THERM (N, 2)、单元局部坐标轴 3 方向的热胀系数 THERM (N, 3) 和无应力时参照温度 TREF^[3]。另外，表 1 中列有 § 4.15 复合材料薄板单元和 § 4.16 复合材料厚板单元。薄板单元和厚板单元都是用于计算分析用不同材质做成的、呈层状布置的复合结构。§ 4.15 和 § 4.16 两种单元之间的差别仅仅是 § 4.15 复合材料薄板单元设定“垂直于板面的线，在变形后仍垂直于板面”^[3]，即忽略剪切变形的影响。而 § 4.16 复合材料厚板单元则设定“考虑剪切变形影响，垂直于板面的直线，在变形以后，不再垂直于板面”^[3]。

综上所述，“SAP 91 使用手册”给出的 17 种单元都是单一材料构成的单元。任何使用 2 种材料做成的结构物在进行其计算分析时，都应该仿照 § 4.15 和 § 4.16 那样计入 2 种不同材料交界处的应力和变形关系，建立单元模型推导能代表复合材料单元的子刚度矩阵。因此上述专家调查组所说的“Super SAP (91) MARC 动力计算软件”的单元库中，原本就没有适用于计算綦江虹桥那种由钢管和混凝土 2 种建筑材料构成的复合结构、其外形又是曲线形的曲梁单元。使用一种单元库中并没有合用单元的计算软件又怎么能得出“重庆綦江虹桥垮塌

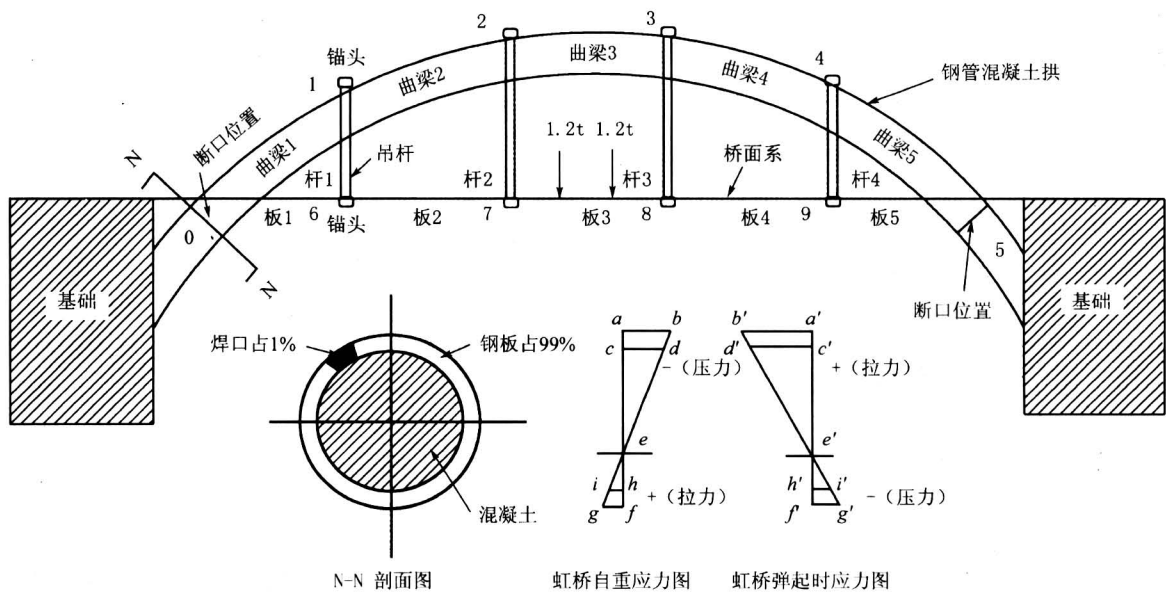


图1 綦江虹桥侧面图

Fig.1 Qi Jiang arch bridge side view

与共振现象无关”的结论呢？这在学术上是很不严谨的，在工程实践中是极其危险的。同理不难证明，凡是在工程设计时使用 SAP 91 程序计算钢管混凝土拱桥节点受力的，实际上都算错了，因而人们通过那些用 SAP 91 计算的钢管混凝土拱桥时必须面临一定的人身安全风险。

利大学发个电子邮件一查便知。

2 SAP 84 程序不能用于綦江虹桥的设计

前面论述了 Super SAP (91) MARC 动力计算软件单元库中没有曲梁单元；由北京大学力学系固体力学教研室、北京大学力学研究所弹塑性动力学研究室袁明武教授等编著的“微型机上的结构分析通用程序 SAP 84 使用手册”^[4]中含有曲梁单元（下称“SAP 84 使用手册”）。

“SAP 84 使用手册”的前言称：“SAP 81 是美国伯克利大学土木工程系教授 Edward L. Wilson 多年来从事结构分析和有限元研究成果的结晶。它是在 SAP 4 的基础上结合微型计算机的特点由他本人精心编制的一套通用结构分析程序，也是国际上最早可在微型机上使用的结构分析通用程序之一。我（笔者注：指袁明武教授）本人曾于 1981 年在加利福尼亚州伯克利大学进修期间参与了 SAP 81 的开发工作。1982 年将当时的 SAP 81 V.1.16 带回国向中国的工程界推广。当时的 SAP 81 共有 FORTRAN 源程序 7000 条。经过 4 年来艰辛的劳动，在工程界广大用户的协助下，完成了 SAP 81-CH, SAP 84 V.2.40 及 SAP 84 V.2.44 等几个主要版本，使得 SAP 84 成为一个受工程界广泛欢迎、能解决工程实际问题的结构分析通用程

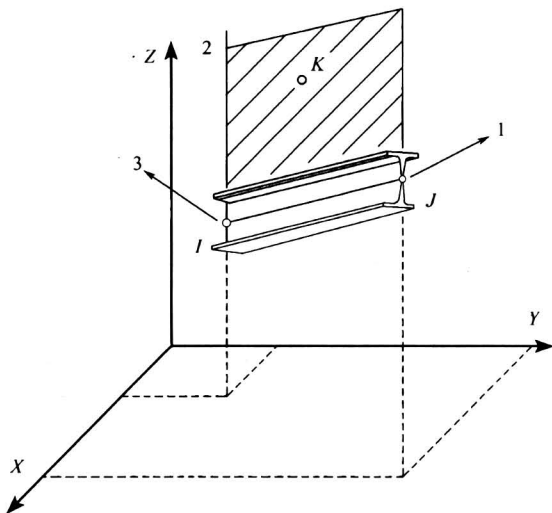


图2 三维梁单元

Fig.2 3 D beam element

其实查证究竟 SAP 91 程序能不能用于计算钢管混凝土拱桥，只要以 SAP 91 程序用户的名义给 SAP 91 程序的开发单位，美国加利福尼亚州伯克

序。目前 SAP 84 V.2.44 共有 FORTRAN 源程序约 30 000 条。”^[4]

在“SAP 84 使用手册”第 88 页还写着：“本程序中的曲梁单元是空间内的平面曲梁单元，它的刚度矩阵是基于柔度法推导出来的精确的单元刚度矩阵公式求积分而得到的。在沿弧长积分时，采用了 5 点高斯积分。因此，它是一个高精度的单元。”^[4]在“SAP 84 使用手册”第 91 页又写着：“本程序中的曲梁单元是空间的等截面平面曲梁。它的几何形状可以是圆、抛物线、双曲线。程序都给出了很好的结果。对于一般的平面任意二次曲线，则采用 7 点 Lagrange 插值，结果也很令人满意”^[4]。显而易见，画在本文图 1 中的曲梁 1 至曲梁 5 其几何形状无论是圆、抛物线、双曲线或是任意二次曲线使用袁明武等编制的 SAP 84 程序中的曲梁单元都肯定会得出令人满意的计算结果，另外在“SAP 84 使用手册”第 88 页还给出一个 1/4 圆弧，半径 $R = 10 \text{ cm}$ ，截面为直径 20 cm 的圆形算例，计算结果（见表 2）表明，用一个曲梁单元比用 8 个直梁单元近似所得到的结果还要好。

表 2 曲梁与用直梁逼近曲梁结果的比较

Table 2 The result comparison of bend beam vs Approximate straight beam to bend beam

	理论解	八段直梁近似	曲梁解
轴力/kg	-1 000	-995	-1 000
弯矩/kg·cm	-10 000	-10 001	-10 000

上述算例一方面证明 SAP 84 的曲梁单元可以用于计算从图 1 綦江虹桥离散出来的曲梁单元，因为前述算例计算的是截面为直径 20 cm 的圆形，而綦江钢管混凝土拱桥的拱肋其截面不正是圆形吗？此外上述算例也证明了不能用列在本文表 1 中 §4.2 梁单元计算綦江虹桥，因为上述 1/4 圆弧算例曾使用 8 个直梁单元逼近曲梁单元，其计算结果表明 8 个直梁单元的计算结果都没有曲梁单元的计算结果精确。那么将 8 个直梁单元简化成一个直梁单元，无疑直梁和曲梁单元的计算结果定会差之千里。

尽管可以使用袁明武等开发编制的 SAP 84 程序的曲梁单元计算钢管混凝土拱桥的曲梁单元，其计算结果也是精确的，可信的。然而笔者为什么说：“SAP 84 程序不能用于綦江虹桥的设计”呢？

下面先讲讲列在本文表 1 中 SAP 91 程序单元库中的那些单元为什么要在单元名称后面增加一个

“卡”字呢？“SAP 91 使用手册”第 5 页在第二部分线性结构分析和场分析数据文件格式的标题下写着：“这一部分给出了运用进行结构与场分析计算时应该输入的数据文件的填写格式。在数据文件中每一张卡代表文件中的一行，每一张卡或卡片组是靠卡名、卡片所用的格式、变量名称、变量的含义以及注解来识别的。”^[3]不言而喻，“卡”是用于输入数据的填写格式。计算机就是依照用户填写的输入数据进行计算分析的。最后将计算结果用一组输出文件提供给用户。然而从打印机打印出来的输出文件又是些什么内容呢？在“SAP 91 使用手册”第 13 页 §4.2 三维梁单元标题下写着：“梁的每个端点上有 3 个互相垂直的力（1 个轴向力，2 个剪力），有 3 个互相垂直的力矩（1 个扭矩，2 个弯矩）。最大正应力可以由轴向力和弯矩共同作用下形成。”^[3]现以本文图 2 那根三维工字钢梁单元为例，计算机按用户输入数据计算后打印机打印输出该三维工字钢梁单元 I、J 两端的 1 个轴向力、2 个剪力、1 个扭矩和 2 个弯矩，每端总共打印 6 个输出数据。众所周知由于工字钢翼缘的宽窄、厚薄不同，腹板的高低、厚薄不同更由于轧制工字钢的钢种不同，因而不同型号工字钢抵抗弯矩、轴向力的能力也不同。要完成全部设计工作，设计工程师必须按照工字钢 I、J 两端的 1 个轴向力、2 个剪力、1 个扭矩和 2 个弯矩进行验算，决定哪一种型号的工字钢除了能满足由上述 6 个应力分量合成的最不利荷载算出的应力能符合规范的规定，也就是说具有足够的安全储备，设计工作才算最后完成。同理，尽管可以用 SAP 84 程序计算綦江虹桥那些钢管混凝土曲梁单元，计算机输出了 1 个轴向力、2 个剪力、1 个扭矩和 2 个弯矩，然而在钢管混凝土拱桥的钢管外径尺寸、焊制钢管钢板的厚度、钢种、钢管的焊缝设计和管中混凝土的强度标号等确定之前，钢管混凝土拱桥拱肋的设计并未完成。SAP 84 程序除了可以算出曲梁单元每端的 6 个节点力以外其他拱肋的设计工作都做不了。因此这一节的标题才写成：“SAP 84 程序不能用于綦江虹桥的设计。”

3 违反力学基本原理的《火力发电厂主厂房钢—混凝土组合结构设计暂行规定（DLGJ 99-91）》

在“SAP 84 使用手册”的前言中写道：“在继

承了 SAP 81 的文件管理系统,分块外存求解器,三维框架,平面单元,多层子结构和高层建筑专用程序段等主要程序模块的基础上,我们除改正了原程序(笔者注:指袁明武教授从美国带回来的 SAP 81 V.1.16 程序)中的若干错误外,主要开发了……4. 曲梁单元……10. 按中国规范的配筋等 20 项功能。”^[4]上述文字表明 SAP 84 程序不仅保留从美国带回来的 SAP 81 V.1.16 程序中的高层建筑专用程序段,又开发了按中国规范配筋的程序段。这样 SAP 84 程序用于高层建筑设计就十分方便了。因为既可以用程序中的高层建筑专用程序段计算出高层建筑梁、柱、板等节点端部的应力,又可以用按中国规范配筋的程序段进行配筋,更可以用 SAP 84 的辅助程序段中 § 7.1 画结构简图、§ 7.2 画彩色结构图和 § 7.3 画彩色振形图等辅助程序绘制图纸。

尽管可以用 SAP 84 的轴向拉压单元计算图 1 中吊杆的节点受力,再用我国钢结构设计规范完成吊杆设计。用 SAP 84 的平面单元计算图 1 中桥面板的节点受力,再用我国钢筋混凝土结构设计规范完成桥面板配筋设计。然而用 SAP 84 的曲梁单元算出曲梁端部的 6 个应力数值以后又如何完成曲梁的设计呢?总不能够用中国的钢筋混凝土结构设计规范来设计钢管混凝土拱桥那 2 根拱肋吧?

由于笔者对钢管混凝土拱桥安全方面的担心,曾于 2001 年 3 月 8 日和 4 月 30 日 2 次致函交通部提出过笔者的意见。2001 年 4 月 18 日在交通部寄给笔者的复函附件中写着:“我国现在有 3 个钢管混凝土规范,它们是:

1989 年由国家建材工业局苏州混凝土水泥制品研究院,中国船舶总公司第九设计研究院颁布的《钢管混凝土结构设计与施工规程(JCJ 01-89)》;

1990 年由中国工程建设标准化协会颁布的《钢管混凝土结构设计与施工规程(CECS 28:90)》;

1991 年由能源部电力规划设计总院颁布的《火力发电厂主厂房钢-混凝土组合结构设计暂行规定(DLGJ 99-91)》”(以下称 DLGJ 99-91)。

前已述及可以用 SAP 84 程序中的曲梁单元算出图 1 中曲梁 1 至曲梁 5 所有节点的轴向力、剪力、扭矩和弯矩。然后再依据前述 3 份钢管混凝土结构设计与施工规程完成钢管混凝土拱桥拱肋的设计。从逻辑上讲,钢管混凝土拱桥的设计和用 SAP 84 程序中的高层建筑专用程序段与按中国规

范配筋的程序段完成高层建筑设计同样是完美无缺了。然而事情果真如此吗?

正当笔者试图按照交通部复信中提供的信息查找 3 个钢管混凝土规范之际,笔者从一位桥梁工程师处借到一本由张联燕、李泽生、程懋方编著的《钢管混凝土空间桁架组合梁式结构》(下称《组合梁式结构》)^[5]。文献 [5] 的主要内容是介绍两座钢管混凝土桥梁,其一是南海市跨越潭州水道的紫洞大桥,主桥为 69 m + 140 m + 69 m 的双塔三跨单索面斜拉桥;其二是湖北省秭归县向家坝大桥。向家坝大桥采用跨径组合为 43.0 m + 72.20 m + 43.0 m 的钢管混凝土全焊空间桁架等截面组合连续刚构。《组合梁式结构》一书对于前述交通部复信中提及的 JCJ 01-89, CECS 28:90 和 DLGJ 99-913 份钢管混凝土规程有关设计使用的验算方法均有详细的引述。

文献 [5] 第 111 页:“钢管混凝土压弯杆件的强度验算分别按照 DLGJ 99-91, JCJ 01-89 及 CECS 28:903 种规范的有关公式进行验算,分述如下:

DLGJ 99-91 第 3.3.5.1 条的验算公式是:

$$\text{当 } N/A_{sc} \geq 0.2f_{sc} \text{ 时, } N/A_{sc} + M/1.5W_{sc} \leq f_{sc} \quad (1)$$

$$\text{当 } N/A_{sc} < 0.2f_{sc} \text{ 时, } 0.7N/A_{sc} + M/1.4W_{sc} \leq f_{sc} \quad (2)$$

式中: N 及 M 为杆端的最大轴向力及最大杆端弯矩;

A_{sc} : 钢管混凝土截面积; $A_{sc} = 0.25\pi D^2$, D 为钢管外径;

W_{sc} : 是钢管混凝土断面抵抗矩; $W_{sc} = \pi D^3/32$, D 为钢管外径(笔者注:在机械设计手册中称“断面抵抗矩”为“抗弯断面模数”)。

f_{sc} : 钢管混凝土轴心受压组合强度设计值,查表 3 取值;表 3 中的钢管混凝土轴心受压组合强度设计值 f_{sc} (MPa) 是根据钢管钢材的种类、管中混凝土的强度等级以及钢管的净截面积除以管中混凝土的面积,称为杆件断面含钢率 α 按内差法确定”^[5]。

式 (1) 中的首项 N/A_{sc} 和式 (2) 中的首项 $0.7N/A_{sc}$, 实际上是在试验室做的钢管混凝土短柱试验搬到现场的钢管混凝土拱桥上去,因而只要 N/A_{sc} 数值小于表 3 中的 f_{sc} 则工程肯定是安全的。如果说有问题的话那就是式 (2) 在轴向力 N 前面增加小于 1 的系数 0.7。编制 DLGJ 99-91 暂

表 3 钢管混凝土轴心受压组合强度设计值 f_{sc} Table 3 Steel pipe-concrete axis press combined strength design value f_{sc}

MPa

钢材	混凝土	$\alpha = 0.04$	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	
3 号钢	C30	27.7	30.0	32.3	34.6	36.8	39.0	41.1	43.3	
	C40	33.1	35.4	37.7	39.9	42.1	44.3	46.4	48.5	
	C50	37.8	40.2	42.5	44.7	46.9	49.0	51.1	53.2	
	C30	32.9	36.4	39.9	43.3	46.7	50.0	53.2	56.3	
16Mn 钢	C40	38.3	41.8	45.2	48.5	51.8	55.0	58.2	61.2	
	C50	43.1	46.6	50.0	53.3	56.5	59.6	62.7	65.3	
	C30	34.6	38.5	42.4	46.1	49.8	53.4	57.0	60.4	
15MnV 钢	C40	40.0	43.8	47.6	51.3	54.9	58.4	61.9	65.2	
	C50	44.8	48.6	52.3	55.9	59.5	63.0	66.4	69.7	
钢材	混凝土	$\alpha = 0.12$	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20
3 号钢	C30	45.4	47.5	49.5	51.5	53.5	55.5	57.4	59.3	61.2
	C40	50.5	52.5	54.5	58.5	58.4	60.3	62.2	64.0	65.8
	C50	55.2	57.2	59.1	61.0	62.9	64.8	66.6	68.4	70.1
	C30	59.4	62.4	65.4	68.3	71.2	74.0	76.7	79.4	82.0
16Mn 钢	C40	64.2	67.1	70.0	72.8	75.5	78.1	80.6	83.1	85.5
	C50	68.9	71.6	74.3	77.0	79.6	82.1	84.6	87.0	89.3
	C30	63.8	67.1	70.4	73.6	76.7	79.7	82.6	85.5	88.3
15MnV 钢	C40	68.5	71.6	74.7	77.7	80.7	83.5	86.3	88.9	91.5
	C50	72.9	75.9	78.9	81.8	81.7	87.4	90.1	92.6	95.1

注：中间值可采用插入法求得

行规定的工程师们如果怀疑用诸如 SAP 84 等结构分析通用程序计算的杆件节点轴向力偏大，就应该将其弃之不用，自己动手编写新的有限单元法程序求解自己认为靠得住的杆端轴向力，而不该任意将轴向力打个折扣。打折之后轴向力小了，自然钢管混凝土杆件截面可以小一点，表面上是为业主、为国家节省点建设资金。人们知道，有限单元法求解杆件受力时都是按照结构物的荷载进行的，荷载中的活荷载主要是乘车或步行过桥人的荷载。将轴向力 N 缩小无异于将荷载的数值减小，这就是人们通过钢管混凝土拱桥时必须面临的第二个人身安全风险。

式 (1) 中的第二项 $M/1.5W_{sc}$ 和式 (2) 中第二项 $M/1.4W_{sc}$ 也有问题。举例来说，钢管外径为 700 mm 的断面抵抗矩 $W_{sc} = 0.0337 \text{ m}^3$ ，将其乘以 1.5 的系数 W_{sc} 是 0.05055 m^3 ，不难计算 W_{sc} 等于 0.05055 m^3 的钢管外径应该是 802 mm。将 W_{sc} 扩大 1.5 倍其结果无异于设计工程师在设计钢管混凝土拱桥时是按钢管外径为 802 mm 计算的，而施工时施工工人实际使用的钢管外径仅为 700 mm。施工用的钢管外径比设计的钢管外径小了 102 mm。这就是人们通过钢管混凝土拱桥时必须面临的第三个人身安全风险。值得引起人们和有关单位注意的是，用直径粗的钢管设计，用直径细的钢管施工明

明是一种偷工减料行为，却居然写进了“设计规程”。

撇开式 (1)、式 (2) 中会导致结构物偏于不安全一侧所有的系数，则式 (1)、式 (2) 可写为：

$$N/A_{sc} + M/W_{sc} \leq f_{sc} \quad (3)$$

表面上看由轴向力 N 引起的压应力加上由弯矩引起的压应力，只要数值上小于表 3 经试验测定的钢管混凝土轴心受压组合强度设计值 f_{sc} ，结构物肯定是安全的。然而实际工程中并非完全如此。

“国内建筑部门对钢管混凝土结构已进行大量系统的试验研究工作，并已制定了相应的设计与施工规范。而公路部门尽管已修建了许多以钢管混凝土为承重结构的公路桥梁（主要是拱桥），但其设计理论研究刚起步，缺乏与之相适应的设计与施工规范。特别是材料的物理力学指标的取值及构件强度及稳定的计算，目前只能参照建筑部门已有的规范执行，严重滞后于工程实践。现针对主桥（笔者注：指南海紫洞大桥）采用的材料进行杆件极限承载能力及组合弹性模量试验，为主桥的设计与施工提供基本依据。试验用钢管采用 16Mn 无缝钢管，直径为 140 mm 及 $\phi 299 \text{ mm}$ ，壁厚 10 mm 及 12 mm；核心混凝土强度等级为 C50；水灰比 0.44，坍落度 4~6 cm，用插入式振捣器在钢管内振捣成型，封闭自养 28 天，试件长径比为 $3.0^{[5]}$ 。关于

杆件极限承载能力的试验结果,文献[5]认为“两种钢管混凝土短柱在达到极限荷载之后,承载力虽然已丧失,但柱身未见裂纹,钢管内混凝土保持完整,混凝土已由脆性材料转为塑性材料、构件具有良好的变形能力。此结论与其他部门已有的试验结果相同。”

从前述引文得知,钢管混凝土短柱试验仅仅是针对式(3)首项 N/A_{sc} 作的。因而写在式(3)中的第二项 M/W_{sc} 实际上成了没有任何试验支持的,是工程师们主观杜撰出来的计算式。这就是人们通过钢管混凝土拱桥时必须面临的第四个人身安全风险。

也许有人会说用 M/W_{sc} 计算弯矩作用下引起构件应力的计算办法不是早就写在结构力学的书籍之中,难道还需要试验吗?诚然用 M/W_{sc} 的计算方法早已有之,是经过历史和工程实践检验的正确计算方法。但值得注意的是,在本文式(1)、式(2)的注释中写着:“ W_{sc} : 钢管混凝土断面抵抗矩; $W_{sc} = \pi D^3/32$, D 为钢管外径。我国几千万条承受弯矩作用的汽车车轴可以用 $W_{sc} = \pi D^3/32$

计算且万无一失,几百万根承受弯矩作用的火车车轴也可以用 $W_{sc} = \pi D^3/32$ 计算,实践证明可以保证乘客和货物运输的安全;然而那几百根钢管混凝土构件也用 $W_{sc} = \pi D^3/32$ 计算却大错特错了。问题是究竟错在那里呢?

图3是复印自“SAP 91 使用手册”^[3]第17页的梁单元应力图。图3的上半部份画的是用式(3)中首项 N/A_{sc} 计算在梁端部引起的应力图,由轴向力引起的应力是匀布的,任何一点的压强都是相同的;下半部份画的是式(3)中第二项 M/W_{sc} 在梁端引起的应力图,按 M/W_{sc} 计算得到的应力图不再是匀布的,而是在梁端出现两个最大值均等于 M/W_{sc} , 然后逐渐减小,愈靠近中心应力愈小,在图形中点处应力为零的两个三角形,其中一个三角形为压力,在其对面的那一个三角形则为拉力,这样才能形成力偶去平衡以弯矩形式出现的外力。由于钢铁是一种拉、压同性的材料,因而无论用钢铁做的火车车轴,还是汽车车轴,它们都能够承受同时出现在车轴同一截面上的拉力和压力,因而才能保证车辆运行安全。

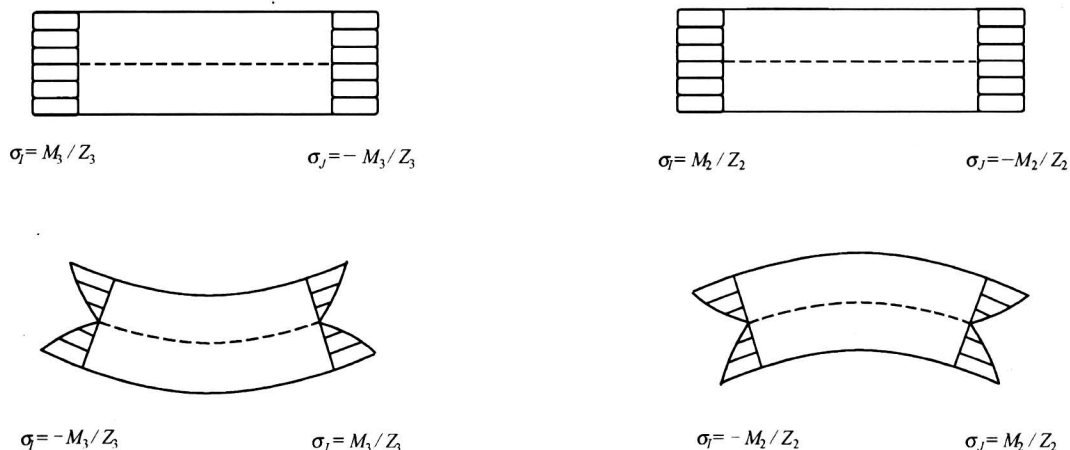


图3 梁单元应力图

Fig.3 Stress diagram of beam element

文献[6]第28页表5:混凝土极限强度50 MPa的C50混凝土轴心受压强度,只允许用到23 MPa,弯曲受压强度只允许用到28 MPa,而受拉强度仅为1.4 MPa。表明混凝土是一种承受拉力、压力时强度相差几十倍的拉压不同性的材料。人们知道使用宽度为 b 、高度为 h 的拉、压同性材料建造舰、飞机,甚至是航天器中的梁,设计工程师都按通过 $h/2$ 处的断面抵抗矩 W 为 $bh^2/6$ 作设计。

可是土木工程师在设计钢筋混凝土矩形截面梁时,却不能用 $bh^2/6$,而是按照混凝土只能承受压力,所有拉力全部由受拉钢筋承担的方法设计矩形截面的钢筋混凝土梁。图4是钢管混凝土构件的断面图,假设图4上半圆受压力,下半圆受拉力,由于灌在钢管中的混凝土 d_{gf} 不能承受拉力,按照钢筋混凝土结构学的原理为寻求由拉力形成的弯矩与由压力形成弯矩的平衡,此时应力为零的中性轴 $0 \sim$

0 离开圆心移向受压区。前面说的钢管混凝土断面抵抗矩 $W_{sc} = \pi D^3/32$ 是依据中性轴通过圆心处推导的，因而 DLGJ 99-91 第 3.3.5.1 条规定用式 (1)、式 (2) 进行钢管混凝土压弯杆件强度验算是十分错误的。这就是人们通过钢管混凝土拱桥时必须面临的第五个人身安全风险。之所以发生上述错误是编写“DLGJ 99-91 规程”的工程师们在制定式 (1)、式 (2) 时没有做钢管混凝土构件的抗弯曲试验。

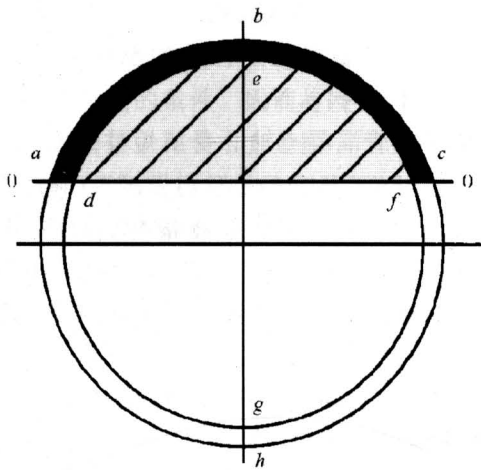


图 4 钢管混凝土构件断面图

Fig.4 Steel pipe-concrete component cross section

DLGJ 99-91 规定钢管混凝土压弯杆件强度验算用 $W_{sc} = \pi D^3/32$ ，意味着被验算的结构物应该用拉、压同性的材料制造。显然钢管的钢材是拉、压同性材料。如果灌在钢管中的是铜、铁、锡、铝、铅甚至是塑料都属于拉、压同性的材料，在上面提到的 6 种材料中以铁的单价最低。如果钢管里面灌的是铁，那又何须先焊根钢管再向里面倒铁水呢，何必不直接用圆钢作成拱肋，那样不是更省事吗？依此逻辑不难推证，如果要建筑物的材料提供 $W_{sc} = \pi D^3/32$ 的受力物理状态，那么架设在綦江上的本应该是两根圆钢作的拱肋。用一根薄壁（使用厚钢板人们就不可能弯制并焊接成沿前进方向呈拱形，断面呈圆形的拱肋）钢管，里面灌上混凝土代替圆钢作成拱肋，原本是一件十分明显的偷工减料行为，这就是人们通过钢管混凝土拱桥时必须面临的第六个也是最危险的人身安全风险。值得提醒人们注意的是任何工程计算都不仅仅是数学运算，工程计算的计算式实际上是用来描述建筑物客观存在的某种物理现象。钢管混凝土不能提拱 $W_{sc} =$

$\pi D^3/32$ 的物理状态，因而本文这一节的标题才写成：“违反力学基本原理的《火力发电厂主厂房钢—混凝土组合结构设计暂行规定（DLGJ 99-91）》”。其实，綦江虹桥上的 40 死、14 伤就是上述偷工减料行为的受害者。

4 最不利受力情况验算

前已述及，使用 SAP 91 程序计算的结果，给出梁每个端点处的 1 个轴向力和 2 个弯矩，依此可以计算梁端的最大应力。据此在“SAP 91 使用手册”^[3]第 15 页第 15 行的梁单元截面性质数据卡标题下写着：

$$R_1/A_1 \pm M_2/Z_2 \pm M_3/Z_3 (\text{最不利情况})$$

式 (4) 中的 R_1 即本文式 (1)、式 (2) 中的杆端最大轴向力 N ；式中的 A_1 即本文式 (1)、式 (2) 中的钢管混凝土截面积 $A_{sc} = 0.25\pi D^2$ ；式中的 M_2 即本文式 (1)、式 (2) 中的出现在垂直于图 1 綦江江面方向杆端弯矩 M ；式中的 Z_2 即本文式 (1)、式 (2) 中的钢管混凝土断面抵抗矩 W_{sc} ，但其数值不是 $\pi D^3/32$ ；式中的 M_3 是垂直于图 1 纸面方向的弯矩；式中的 Z_3 是杆件垂直于图 1 纸面方向被验算构件的断面抵抗矩。比较式 (1)、式 (2) 和式 (4) 不难发现，DLGJ 99-91 规定的钢管混凝土结构强度验算与按“SAP 91 使用手册”里最不利情况的计算办法相比，按式 (1)、式 (2) 的验算遗漏了一 M_2/Z_2 和 $\pm M_3/Z_3$ 两项。上述遗漏显然对确保被验算结构物使用安全极为不利，因而这是人们通过钢管混凝土拱桥时必须面临的第七个人身安全风险。使笔者百思不解的是，编写 DLGJ 99-91 规程的工程师们丢弃 $-M_2/Z_2$ 和 $\pm M_3/Z_3$ 两项的依据是什么呢？

鉴于目前我国步兵操典中并未列入严禁部队官兵列队跑步过桥或整步过桥的条文，否则 1999 年 1 月 4 日那 22 名武警战士跑到綦江虹桥桥头时带队人员就会下达部队改为散步行进的口令，或就不会出现綦江虹桥惨案了。既然客观上存在人员跑步过桥或整步过桥的可能，那么设计工程师在计算式 (4) 中的 M_2 时就应该计算包括由于人员跑步或整步过桥时额外产生的弯矩。同理，设计工程师在计算式 (4) 中的 M_3 时也应该计算在建桥地区出现国家明令设防地震烈度地震时产生的弯矩。

“2001 年 11 月 7 日，四川省宜宾市南门大桥发生垮塌事故后，四川省有关部门决定对全省 1.5

万座桥梁进行安全检查。据了解这次检查的重点是斜拉桥、悬索桥、系杆拱桥、肋拱桥等类桥梁以及其他轻型桥梁结构进行安全评价”^[7]。笔者认为我国有关单位是否应该比照四川省交通厅的做法,对自己管辖范围内的钢管混凝土拱桥要求该桥的原设计工程师补做一些设计检查呢?检查内容是否应该包括:去掉式(2)中轴向力 N 前面的 0.7,式(1)、式(2)中钢管混凝土断面抵抗矩 W_{sc} 前面的 1.4 和 1.5,再加上式(4)的第三项 M_3/Z_3 ,看看计算结果有没有超过钢管混凝土轴心受压组合强度设计值 f_{sc} ?然后再算算 DLGJ 99-91 遗漏了的由 $R_1/A_1-M_2/Z_2-M_3/Z_3$ 两项引起钢管壁的最大应力有没有超过焊制钢管的极限应力呢?需要说明的是,无论是 Z_2 还是 Z_3 都不能用 $\pi D^3/32$ 。做过上述检查之后再对那些桥梁结构进行安全评价,就比仅仅做外观检查更有科学依据,也才会发现那些钢管混凝土拱桥不安全问题的严重程度了。

5 学术上极不严谨的三种稳定验算方法

文献[5]对钢管混凝土压弯杆件除了要求应按 DLGJ 99-91 第 3.3.5.1 条验算公式(即本文的式(1)、式(2))进行强度验算外,还要求:“应按 DLGJ 99-91 第 3.3.5.2 条的规定进行验算。”

DLGJ 99-91 第 3.3.5.2 条的验算公式是:

当 $N/\phi A_{sc} \geq 0.2f_{sc}$ 时,

$$N/\phi A_{sc} + \beta_m M/1.5W_{sc}(1 - 0.4N/N_E) \leq f_{sc} \quad (5)$$

当 $N/\phi A_{sc} < 0.2f_{sc}$ 时,

$$0.7N/\phi A_{sc} + \beta_m M/1.4W_{sc}(1 - 0.4N/N_E) \leq f_{sc} \quad (6)$$

式中: ϕ 是轴心受压稳定系数,由表 4-5(从略)查得,表中 λ 是杆件长细比, $\lambda = 4L/D$, L 是杆件的计算长度, D 是钢管外径;

β_m 为等效弯矩系数,按《钢结构设计规范》(GBJ17-88)的规定取值;

N_E 为欧拉临界力, $N_E = \pi^2 E_{sc} A_{sc} / \lambda^2$, E_{sc} 是钢管混凝土组合弹性模量,由表 3-1(从略)取值。

同时,文献[5]又沿用 JCJ 01-89 的验算公式:

$$N_e \leq \gamma \varphi_e (A_s f_s + K_1 A_c f_c) \quad (7)$$

式中: N_e —杆件平均分摊计入接轨系数及空间扩大系数的最大轴向力;

γ —是 φ_e 的修正值, $\gamma = 1.124 - 2t/D - 0.0003f_s$, t 是钢管壁厚, D 是钢管外径;

φ_e —钢管混凝土偏心受压杆件设计承载力折减系数,按表 4-6(从略)取值,表中 e_0 是杆件初始偏心距, $e_0 = M/N_e$, M 为最大杆端弯矩;

式(7)的其他符号解释从略。

文献[5]也沿用 CECS 28:90 的验算公式:

$$N \leq N_u \quad (8)$$

式中: N_u —是钢管混凝土杆件的承载力设计值;

$$N_u = \varphi_1 \varphi_e N_0;$$

N_0 —钢管混凝土轴心受压短柱的承载力设计值; $N_0 = f_c A_c (1 + \Theta^{0.5} + \Theta)$, Θ 是钢管混凝土套箍指标, $\Theta = f_c A_s / f_c A_c$;

φ_1 —是考虑杆件长细比影响的承载力折减系数。

我国某高速公路一座预应力跨线桥,承包商施工时用竹杆架立支撑跨线桥的模板。模板尺寸、钢筋尺寸和间距以及预应力锚索预留孔尺寸和位置,经工地工程师检查合格之后批准承包商灌注混凝土。混凝土灌注完成后跨线桥模板出现明显的弯曲变形,不仅使跨线桥的断面尺寸发生变形,且预应力锚索预留孔的位置也发生了变化。模板产生变形的原因是,原本直立支撑模板用的竹杆在数千千牛混凝土重力作用下被压弯。工程界对任何承受拉力的杆件只要进行强度验算,证明该杆件在外力作用下不仅不会被拉断,而且具有符合相应设计规范规定的安全储备就可以了,无需进行其他验算。但是任何承受压力的杆件如果只做本文式(1)、式(2)那样的强度验算,证明在外力作用下该杆件不会被压断且具有符合设计规范规定的安全储备也是不充分的。因为承受压力的杆件在外力作用下虽然不会被压断,但是却可能像上述支撑跨线桥模板的竹杆那样被压弯。工程界计算在压力作用下杆件会不会被压弯的验算称之为:“稳定验算”。上述竹杆受压弯曲现象称之为“丧失稳定”。受压杆件稳定计算的奠基人欧拉发现,受压杆件弯曲及丧失稳定与杆件的长细比有关。在本文式(5)、式(6)和式(8)的符号解释中都提到了“杆件长细比”。因而笔者判定式(5)、式(6)和式(8)均属欧拉提出的受压杆件稳定验算。式(7)的符号说明中虽未

见杆件长细比字样，然而式 (7) 也不像式 (1)、式 (2) 那样明显地属于受压杆件的强度验算，故将其列入受压杆件的稳定验算之中。

值得注意的是，欧拉当初提出受压杆件稳定验算是针对初始状态是笔直的杆件，他制定的杆件长细比为 $\lambda = 4L/D$ 。而对钢管混凝土拱桥来说，从本文图 1 中画着的曲梁 1 至曲梁 5 其起始状态都是弯曲的。那么在稳定验算中的杆件长度 L 是用曲线长度呢还是用直线长度？此外曲梁的屈度可能是圆，是抛物线，是双曲线或是平面内任意二次曲线。上述所有线形都不符合欧拉公式描述的杆件初始状态为直线的条件。因而将欧拉的稳定验算办法用来验算曲梁，在学术上是极不严谨的，用式 (5) 至式 (8) 进行受压杆件稳定验算过的钢管混凝土拱桥并不能确保那些曲梁单元不会丧失稳定。尤其是图 1 中所有的曲梁单元除了在背离綦江江面方向屈度增大丧失稳定以外，还可能出出现垂直于图 1 纸面方向的弯曲。还尤应注意的，在垂直于纸面方向的拱肋稳定验算时，杆件的计算长度 L 用什么呢？所以说虽然经稳定验算过的钢管混凝土拱桥仍然具有由于拱肋丧失稳定导致桥毁人亡的可能性，这就是人们通过钢管混凝土拱桥时必须面临的第八个人身安全风险。

值得指出的是，由国家建材工业局苏州混凝土水泥制品研究院、中国船舶总公司第九设计研究院颁布的《钢管混凝土结构设计与施工规程 (JCJ 01-89)》和由中国工程建设标准化协会颁布的《钢管混凝土结构设计与施工规程 (CECS 28:90)》，以及由能源部电力规划设计总院颁布的《火力发电厂主厂房钢—混凝土组合结构设计暂行规定 (DLGJ 99-91)》，有关钢管混凝土结构设计与施工规程原本都是针对笔直杆件制定的，并不能用于曲梁单元。笔者指的学术上极不严谨的问题，是指将 JCJ 01-89, CECS 28:90 和 DLGJ 99-91 引用于钢管混凝土拱桥设计出现的问题，并非上述 3 个“规程”本身存在的问题。

6 应该由设计者承担责任的错误

笔者曾和一位桥梁研究室主任谈过钢管混凝土拱桥的问题，并请他设法借阅一份那种桥型的设计计算单。据他说，桥梁的设计计算单，国内所有单位几十年来都作为秘密件不外借。

关于佛陈大桥，文献 [8] 报道说：“佛陈大桥

位于佛山市与顺德市交界处，跨越北江支流东平河，1994 年 4 月建成通车。大桥全长 849.84 m，主桥为跨径 112.8 m，桥宽 26 m 的下承式钢管混凝土刚构系杆拱桥，钢管混凝土拱肋矢跨比 1/5。”……该桥经 5 年多运营后发现，主桥结构出现多种病害，并危及桥梁的安全。主桥缺陷包括：水平系杆预应力索锈蚀严重并有部份钢绞线整根断裂；拱肋钢管内混凝土填充不实并伴有孔隙，拱肋及横撑钢管表面锈蚀；拱肋两端（拱脚）钢管应力超过规范容许值；主桥立柱局部范围混凝土应力接近容许值。为此，佛山市交通发展总公司决定对佛陈大桥进行全面加固。”^[8]

图 5 是《佛陈大桥》一文中给出的拱肋加固前断面图和拱肋加固后断面图。从图 5 可见，佛陈大桥钢管混凝土拱肋的断面原本是作成哑铃形的。佛陈大桥拱肋的加固办法是：“先在全桥 4 处拱趾 17 m 长的范围增加一圈钢套管，然后灌注 50 号微胀混凝土并压浆填充”^[8]，即先将 4 处拱趾 17 m 长的范围内原哑铃形拱肋铃球的两边各加焊一块钢板，使加固前的哑铃形拱肋变成圆端矩形拱肋，然后向新增钢板围起来的空内灌注 50 号微胀混凝土并压浆填充。

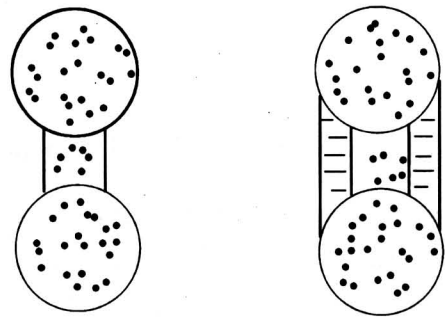


图 5 佛陈大桥拱肋断面图

Fig.5 Fochan Bridge arch rib cross section

佛陈大桥加固前的拱肋应按上文所引的式 (1)、式 (2) 进行强度验算。然而断面呈哑铃形的拱肋又怎么按 $\pi D^3/32$ 计算呢？钢管外径 D 又该用什么数值呢？也许有人会说那一定是佛陈大桥的设计工程师自己推算了 W_{sc} 的计算办法。图 4 是计算钢管混凝土中性轴位置的示意图。从图中可知计算受拉一侧弯矩时要计算圆弧形 ahcfdg 的面积乘以钢管钢材的屈服强度再乘以圆弧形 ahcfdg 形心位置到 0-0 轴的距离。但据笔者所知，眼下还没

有人推导出圆弧形 ahcfdg 的形心位置。因而钢管混凝土构件承受弯矩后其中性轴位置应该是个无解之题。既然中性轴位置都算不出来，又如何能计算钢管混凝土的断面抵抗矩 W_{sc} 然后带入式 (1)、式 (2) 进行强度验算呢？那么简单的圆弧形 ahcfdg 形心位置，都没有办法计算，比圆弧形复杂得多的大半个哑铃形的形心位置又有谁能算得出来呢？

佛陈大桥拱肋的加固结果是将 4 处拱趾由加固前的哑铃形改成圆端矩形。那么圆端矩形的中性轴位置又该怎么计算呢？如果没有办法计算，表面上看佛陈大桥是花钱加固了，然而加固后的佛陈大桥安全度够吗？真的不会发生危及行人生命安全的危险了吗？

把 DLGJ 99-91 规程中原本用于圆形截面钢管混凝土构件的部份移用于佛陈大桥的哑铃形，加固时又改成圆端矩形，其存在的技术错误责任，只有由佛陈大桥的原设计工程师和加固设计的工程师承担了。

因而，像佛陈大桥乃至与之相同的那些哑铃形拱肋、圆端矩形拱肋以及蚌壳形等等非圆形拱肋做成的钢管混凝土拱桥，究竟有没有设计规范可依？我们国家有关法律、法规允许不允许将没有设计规范可依的桥梁和其他建筑物投入使用？笔者认为该认真查一查，因为这也是个与行人生命安全有关的问题。

7 严禁集体跑步过桥或整步过桥

交通部写给笔者的一封复信附件（以下称“复函”）中写道：“关于人群整步过桥这一直是国内外所不允许的。即使部队过桥，也必须散步，严禁在统一口令下跑步过桥。否则对于轻型桥梁，有可能出现共振破坏，即桥梁自振基频与跑步频率相同，发生共振，导致应力、振幅过大而垮桥。”

令人遗憾的是，上述“严禁”在部队中并未执行，否则 1999 年 1 月 4 日 18 时 50 分那 22 名武警战士就不会跑步通过綦江虹桥。因此，严禁集体跑步或整步过桥的科学知识，应当给予足够的普及和重视。

“复函”指的“否则对于轻型桥梁，有可能出现共振破坏。”从图 4 可见，式 (1)、式 (2) 强度验算使用的 $W_{sc} = \pi D^3 / 32$ ，那是圆形截面断面抵抗矩 W_{sc} 中数值最大的一个。显而易见，一旦中性轴 0-0 离开圆心处，由于受压面积减小 W_{sc} （如果能算的话）亦应减小；再加上在式 (1)、式 (2)

中将轴向力 N 缩至 0.7，又将 W_{sc} 扩大 1.4~1.5 倍，因而把轴向力 N 往小处算，将断面抵抗矩 W_{sc} 往大处使，依此设计的钢管混凝土拱桥能不是轻型桥梁吗？这也是綦江虹桥垮塌的原因之一。

“复函”中指出的：“有可能出现共振破坏，即桥梁自振基频与跑步频率相同，发生共振，导致应力、振幅过大而垮桥。”上述桥梁自振基频与跑步频率相同，会发生共振并将振幅放大，振幅放大的后果是使梁体弯矩增大。再看图 1 中的 N-N 剖面图，一旦那座跨度 120 m 的綦江虹桥像人们上船走过跳板那样上下振动起来出现较大的弯矩弯折拱肋时，能拉住大桥使它不垮，靠薄薄的钢管壁，还是靠钢管中的混凝土？这就是抵抗弯矩能力极低的綦江虹桥在 2 min 以内彻底垮塌的道理。值得人们忧虑的是，在綦江虹桥出现过的物理现象不会在其他钢管混凝土拱桥上重现的依据是什么呢？

8 转变设计思想，建造不会垮塌的工程

就以武汉长江大桥为例讲讲这个问题。武汉长江大桥是按最不利荷载设计的。大桥设计荷载包括水流荷载、风载、火车荷载、公路汽车荷载和行人荷载。先说水流荷载，从武汉长江大桥通车至今武汉段长江洪水到达或超过设计水位的时间总计又能有几十天呢？再说风载，从通车至今武汉长江大桥遇到设计风载那样强风的时间累计又有几周呢？火车荷载是按铁路规范中 -22 级荷载设计的，实际通过大桥的列车能真正符合中 -22 级荷载的两列重车在桥上交汇的机率又有多大呢？公路荷载那可是按大桥所有车道上一辆接着一辆布满满载的黄河牌 JN150 或日野 KB211 计算的。即使偶尔大桥的所有车道都布满车辆，由于堵在桥上的车辆中一定有大量的小车、空车，并非全是黄河牌 JN150 和日野 KB211 的重车，因而实际的公路荷载肯定比大桥的公路设计荷载小。至于行人荷载那是在武汉长江大桥所有人行道，包括只有养路工走的铁路桥人行道都是按 3000 N/m^2 即相当于有 5 人/ m^2 站在那里设计的。上述公路和行人荷载几十年来肯定从未出现过，可以说武汉长江大桥从来都没出现过设计工程师设计时用的那种水流荷载、风载、火车荷载、公路和行人荷载的最不利组合。

再说建造武汉长江大桥使用的钢材和混凝土。文献 [6] 可知，强度为 50 MPa 的 C50 混凝土，

设计时用的最大压应力是 28 MPa, 只及极限强度的 56%, 混凝土中出现拉力的地方, 设计只准用到 1.4 MPa; 武汉长江大桥用的钢材包括建造钢梁的型钢和浇筑在混凝土里面的钢筋。我国钢结构和钢筋混凝土结构设计规范都规定允许设计应力都只及钢材屈服极限的 60% 左右, 如以钢材断裂强度计算, 允许设计应力连钢材断裂强度的一半都不到。笼统的讲即使武汉长江大桥偶尔出现一次前述那些最不利荷载组合时, 大桥中的任何钢铁和混凝土离着破坏还有大约 40% 的富裕能力。因而人们尽管买张卧铺票即使列车正运行在桥上碰巧发生国家明令设防地震裂度的地震时, 也可高枕无忧地通过大桥, 说明土建工程的安全度实际上是很高的。那些带有人员伤亡垮塌了的工程肯定在设计上存在重大错误, 否则建筑物决不会垮塌。在监理工程师正常监督下施工的施工工人惹不了那么大的祸。因而本文的标题才命名为应该认真查找“豆腐渣”工程设计上存在的错误。

诚然, 武汉长江大桥其外观看起来有些平淡、呆板, 然而它却在确保行人人身安全的条件下工作了半个世纪。按现有的大桥养护维修办法执行, 除了大桥的公路路面以外, 该桥再用半个世纪也决无问题。那座綦江县标志性工程的綦江虹桥看起来尽管美观, 然而从 1996 年 2 月 15 日投入使用至 1999 年 1 月 4 日彻底垮塌, 其存世之日不足 3 年还搭上 40 条人命、14 位伤员、15 名罪犯和 1000 万元建造新桥的费用。我国的建筑界从建国之初就能建造安全度很高的武汉长江大桥; 但“发展”、“进步”到眼下带有人员伤亡的“豆腐渣”工程却

时有所闻。看来吴良镛院士对我国建筑界现存思潮的评论, 即“全然抛却建筑适用、经济等基本原则, 追求前所未有的形式, 所谓新、奇就是一切”^[9], 值得国人认真思考。

笔者期望我国的建筑界能尽快从迷失中走出来, 克服科技工作中急于求成的浮躁心态, 转变设计思想, 遵循安全、耐用、适用的建筑设计原则, 设计建造使所有建筑物都具有如同武汉长江大桥具有的安全度在百年之内决不会垮塌的工程。

参考文献

- [1] 北京晚报记者. 綦江虹桥大事记[N]. 北京晚报, 1999-3-26(4)
- [2] 北京晚报记者. 澄清一个事实, 与共振无关[N]. 北京晚报, 1999-4-2(4)
- [3] 美国伯克利大学. ALGOR FEAS (Super SAP 91 年版)[A]. 有限元专用 CAD 系统 ViziCad 及其使用手册[M], 1991
- [4] 袁明武. 微型机上结构分析通用程序 SAP 84 使用手册[M]. 北京: 北京大学, 1986
- [5] 张联燕, 李泽生, 程懋方编著. 钢管混凝土空间桁架组合梁式结构[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999
- [6] H. JI. 泰培金, K. Θ. 塔里. 钢筋混凝土结构构件计算实例[M]. 张毅强译, 北京: 中国工业出版社, 1962
- [7] 北京晚报记者. 1.5 万座公路桥梁接受体检[N]. 北京晚报. 2001-12-2(13)
- [8] 郑强, 孙国安. 佛陈大桥缺陷原因分析及加固[J]. 中国铁道科学, 2000, 21(4): 21~29
- [9] 吴良镛. 最尖锐的矛盾与优越的机遇——中国建筑发展寄语[J]. 中国工程科学, 2004, 6(2): 13~16

Analyzing Design Mistakes in the “Bean Curd Dregs” Engineering Design

Zhang Zhaoshen

(China Academy of Railway Sciences, Railway Engineering Research Institute, Beijing 100081, China)

[Abstract] The paper discusses the omission in analyzing the worst stressed state and the mistake in strength and stability checking computations method for compression and bending member, by analyzing the available construction calculation analysis program function, in order to approach the reason of QiJiang arch bridge breakdown. Especially the paper queries whether there exists the bend section modular calculating method for dumbbell or round end rectangular section arch rib, to prove the existence of a lot of unsafe factors in the steel pipe-concrete arched bridge. Finally the paper recommends, the designer to change the idea of unilaterally chasing new and strange into the principle of safe, durable and useful, so as to design and build the structure that will never break down for a century.

[Key words] “Bean curd dregs” engineering; mistake of design; degree of safety