

下承式桁架拱渡槽的结构可靠度分析

雷 杰¹ 金伟良² 张爱晖²

(1. 河南省水利勘察设计院 河南 郑州 450008 ; 2. 浙江大学建筑工程学院 浙江 杭州 310027)

摘要 : 针对南水北调中线工程中较为广泛采用的预应力下承式桁架拱渡槽 , 采用空间杆系有限元程序与结构响应面法相结合 , 分析了桁架拱结构在正常设计条件下的可靠度 . 分析计算表明 , 该拱结构可靠度已达到了规定的要求 , 结构是可靠的 , 结构响应面法也是桁架拱渡槽结构可靠度分析的有效方法 .

关键词 : 桁架拱渡槽 ; 结构可靠度 ; 南水北调工程

中图分类号 : U441 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2005)01-0037-04

Reliability analysis of structure of open-spandrel truss-arch type prestressed aqueduct//LEI Jie¹, JIN Wei-liang², ZHANG Ai-hui²(1. Henan Prospecting & Designing Institute of Water Conservancy, Zhengzhou 450008, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Univ., Hangzhou 310027, China)

Abstract : By combination of the 3-D finite element method with the response surface method, a reliability analysis is made of the structure of the open-spandrel truss-arch type prestressed aqueduct, which has been widely used in the South-to-North Water Transfer Middle Route Project. The result shows that the reliability of the aqueduct structure meets the design requirement, and that the response surface method is an effective method for reliability analysis of the aqueduct structure of the open-spandrel truss-arch type.

Key words : truss-arch type aqueduct ; reliability of structure ; South-to-North Water Transfer Project

南水北调中线工程是为解决我国北方地区水资源严重短缺的问题而兴建的一项特大型跨省、跨流域宏伟调水工程 , 在 21 世纪的水利建设和国民经济发展中具有重要的战略地位 . 中线工程输水总干渠长 1 246 km , 仅穿越集流面积 10 km² 以上的河流就有 603 条 , 河道均需采用立交的形式 (渡槽、倒虹吸、涵洞、暗涵等) 通过总干渠 . 预应力下承式空腹桁架拱渡槽兼有拱和梁的特点 , 桁架拱拱脚水平推力主要由下弦杆承担 , 支座无水平推力 , 下弦杆采用预应力钢筋而能有效控制裂缝并减轻结构自重 , 因此被广泛应用于南水北调工程中 .

渡槽的突出特点和分析难点体现在预应力空腹桁架拱上 . 下承式空腹桁架拱由两榀桁架和上、下横系梁固端连接组成复合刚架 , 在竖向和侧向水压力、自重以及风荷载等作用下 , 受力状态呈一个高次超静定的复杂三维结构 . 而南水北调中线工程建筑物的初步设计 , 由于种种原因 , 仍采用单一安全系数 *K* 的老规范 SDL20-78《水工钢筋混凝土结构设计规范 (试行)》^[1] , 它最大的缺点是没有考虑荷载和抗力的

变异性 , 故有必要对按此规范设计的结构构件的真实可靠性进行校核 .

本文结合南水北调中线工程盖族沟排水渡槽 , 在应用有限元方法对桁架拱空间结构受力分析的基础上 , 采用结构响应面法 , 结合结构分析的确定性有限元分析程序^[2]及可靠度计算的一次二阶矩法 (JC 法)^[3] , 对桁架拱结构主要受力状态构件进行可靠度分析 , 从而对结构的可靠性进行评价 .

1 可靠度分析的响应面法

响应面法 (response surface method) 是用一个表达明确的函数 (响应面) 近似替代难以直接表达的真实函数 (真实的极限状态曲面) , 从而将现有的有限元分析方法与一般的可靠度分析方法 (如 FORM 法或 SORM 法) 结合起来 , 进行可靠度分析 . 选取响应面函数的形式时 , 一方面在基本能够描述真实函数的前提下应尽可能简单 , 另一方面应尽量减少响应面函数中的待定系数 , 以减少结构分析的工作量 . 通常取不含交叉项的二次多项式形式 :

$$Z = g(X) = a + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n c_i X_i^2 \quad (1)$$

式中: $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为基本变量; $a, b_i, c_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为响应面函数中的待定系数。

响应面函数中的待定系数, 可选用插值法来确定。插值法也就是指, 对于未知的连续函数 $g(X)$, 只要知道在离散点 $\{X_i\}$ 处的函数值 $\{Z_i\} (i=1, 2, \dots, m)$ 就可以由这些点插值构造一个简单明确的函数使 $\bar{g}(X_i) = Z_i$ 。对于式(1)表示的响应面函数, 只需要 $(2n+1)$ 次插值验算就可以确定其中的 $(2n+1)$ 个待定系数。

桁架拱结构可靠度分析采用的是以求得验算点为目的的迭代的序列响应面法^[4], 其基本思路是选用式(1)表示的响应面函数, 运用插值法确定待定系数, 结合 JC 法求解结构可靠度分析问题。具体步骤如下:

- 假定初始迭代点 $x^{(1)} = (x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ 一般取均值。
- 计算功能函数 $g(x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_n^{(1)})$ 以及 $g(x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)} \pm f\sigma_i, \dots, x_n^{(1)})$ 得到 Z 的 $(2n+1)$ 个点估计值, 其中 f 为一任意值, 它反映展开面的大小。
- 利用这 $(2n+1)$ 个点估计值插值解出待定因子 $a, b_i, c_i (i=1, 2, \dots, n)$, 得到式(1)表示的响应面函数, 从而确定极限状态方程。

d. 由 JC 法求解验算点 $x^{*(K)}$ 及可靠指标 $\beta^{(K)}$, 其中 K 表示第 K 步迭代。

e. 计算 $|\beta^{(K)} - \beta^{(K-1)}|$ 是否满足给定的精度要求。如果满足, 则计算失效概率 P_f 及可靠指标 β , 计算结束; 如不满足, 则按式 $x_M^{(K)} = x^{*(K)} + (x^{*(K)} - x^{(K)}) \frac{g(x^{(K)})}{g(x^{(K)}) - g(x^{*(K)})}$ 调整验算点, 然后返回第二步进行下一次迭代。

本文对于展开面的大小, 第一次展开时取 $f=3$, 第二次以后取 $f=1$ 。

2 计算模型的建立

选择南水北调中线工程中的典型设计建筑物盖族沟排水渡槽为例。盖族沟排水渡槽位于河南省安阳市汤阴县, 工程区属山前冲洪积倾斜平原, 地势开阔, 工程地质条件一般。工程区内总干渠设计流量 $390 \text{ m}^3/\text{s}$, 加大流量 $450 \text{ m}^3/\text{s}$, 渠道纵比降 $1/25000$, 底宽 22.68 m , 一级边坡 $1:3.5$, 渠底高程 87.856 m , 一级马道高程 97.03 m , 堤顶高程 108.05 m 。渡槽设计为 3 跨, 上部结构预应力下承式空腹桁架拱跨径 37.8 m , 下部结构为排架, 基础采用灌注桩。渡槽槽

底纵坡为 $1/500$, 槽底板进口高程 100.36 m , 出口高程 100.133 m , 槽中水流的平均流速 5.0 m/s , 设计流量 $161 \text{ m}^3/\text{s}$, 加大流量 $180 \text{ m}^3/\text{s}$, 槽身过水断面 $6.4 \text{ m} \times 5.6 \text{ m}$ 。

选取一跨桁架拱为分析对象。每跨下承式空腹桁架拱结构由两榀桁架和上、下横系梁固端连接组成复合刚架, 槽身支承于刚架上。每榀桁架由下弦杆、上弦杆、竖杆构成。下弦杆为水平直杆, 竖杆由数根不等长的直杆组成, 上弦杆采用二次抛物线型曲杆。所有构件间均为刚结。桁架拱结构整体上通过两端橡胶支座简支于墩子(或排架)上, 可视为一简支静定梁式结构。利用结构、荷载的对称性, 取半跨桁架拱作为计算模型, 结构计算简图如图 1 所示。

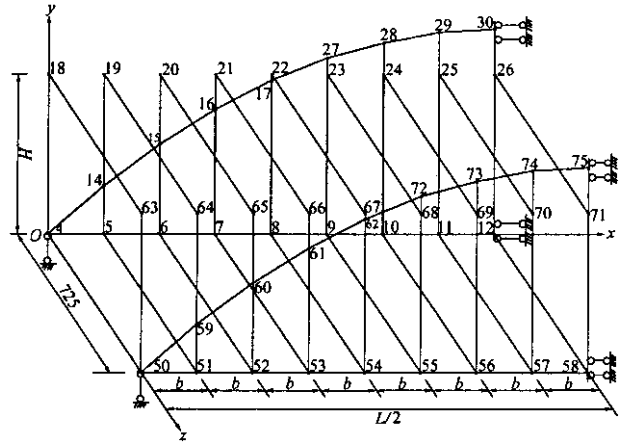


图 1 下承式空腹桁架拱计算简图

桁架拱的内力分析采用空间杆系结构有限元法, 利用结构有限元分析方法来实。具体的计算模型和方法如下:

a. 模型单元划分。半跨空腹桁架拱的上、下弦杆与竖杆连接处以及竖杆与上、下横梁的连接处均为节点, 每两个节点之间的杆件即为一个单元。共划分为 104 个单元, 78 个节点。

b. 整体及局部坐标系。整体坐标系规定以纵向空腹桁架的 4 节点为原点, 顺渡槽水流方向为 x 轴, 垂直水流方向为 z 轴, 垂直水面方向为 y 轴。局部坐标系规定以顺杆件轴向为 1 轴方向, 2 轴方向指向整体坐标系下的 $+y$ (或 $-x$) 方向, 3 轴与 1, 2 轴遵循右手螺旋定则。

c. 材料特性与截面特征值。桁架拱的下弦杆为预应力构件, 预应力筋采用钢绞线。上弦杆、竖杆、上横梁、下横梁等杆件均采用 C50 混凝土, 杆件容重 25 kN/m^3 , 弹性模量 35 GPa , 泊松比 0.167 。截面特征值包括各杆件横截面面积 A 和抗扭惯性矩 J_1 、弯曲惯性矩 I_2, I_3 。所取模型为半跨桁架拱, 跨中各杆件的截面宽度取一半计算。

d. 边界条件。桁架拱与支承排架连接处设简支

型盆式橡胶支座.作为计算模型的半跨桁架拱,在跨中切口处为双链杆,以保证结构满足简支条件. x 方向的边界约束简化成跨中不动,支座处可以移动;支座处 z 方向假定为节点4不动,节点50可以移动.

e. 荷载的简化和作用.作用在桁架拱上的主要荷载有:桁架拱自重、流水槽身自重、人行桥自重、人群荷载、水重、槽中静水压力、风荷载等.人行桥板重和人群荷载均简化成集中荷载作用于上横梁跨中;槽身底板和水重简化成均布荷载施加于下横梁上,侧墙重简化成集中荷载作用于下弦杆各节点上;槽身侧墙上的三角形水压力和水平向风荷载以均布力施加在桁架竖杆上,为使水压力荷载等效,在竖杆端部再施加等效反向力偶;因计算模型为半跨空腹桁架,两端及跨中各荷载均按一半考虑.

3 结构随机变量的不确定性分析

盖族沟排水渡槽桁架拱结构共由104根杆件构成,各杆件所处位置不同,其受力状态不同.根据盖族沟排水渡槽的有限元内力分析及设计成果,从全部杆件中选取各部位最不利的受力状态构件作为典型构件(下弦杆41杆、上弦杆42杆、下横梁68杆、上横梁92杆、竖杆104杆、竖杆51杆),校核其可靠指标是否达到目标可靠指标要求.

渡槽的可靠度分析,选取基本荷载组合工况,即结构自重+水重+水压力(静水压力)+风荷载,进行桁架拱结构承载能力极限状态的结构可靠度计算.人群荷载的数值相对很小,作定值处理.桁架拱结构自重的变异性很小,也作定值处理.水重和水压力形式上不一样,其含义实际上是一致的.取槽中设计水深 H 为随机变量,渡槽承受的风荷载也作为随机变量,服从极值Ⅰ型分布;抗力 R 常被视作与时间无关的随机变量.影响水工结构抗力的主要因素通常有材料性能的不定性、几何参数的不定性、计算模式的不定性、构件各基本变量的不定性以及构件抗力实际值与试件截面抗力实验值之间的不定性.在桁架拱结构可靠度分析时,将 R 作为一个综合基本变量考虑,认为它服从对数正态分布,综合考虑了以上所述的各种不确定性.总之,在响应面法可靠度分析中,选取结构抗力 R 、槽中水深 H 、风荷载 W 为随机变量,各随机变量的统计参数参考文献[6]确定(见表1).采用响应面函数表达的桁架拱结构的极

限状态方程为

$$Z = R - S = R - (a + b_1 H + b_2 W + c_1 H^2 + c_2 W^2) = 0 \tag{2}$$

式中: R 为结构抗力; S 为荷载效应; H 为槽中水深; W 为风荷载; a, b_1, b_2, c_1, c_2 为待定系数.

4 可靠度计算结果分析

结合结构有限元分析方法,运用响应面法计算出盖族沟渡槽桁架拱结构的响应面函数的待定系数值(表2)和可靠指标及失效概率(表3).

表2 响应面函数的系数

典型构件	a	b_1	b_2	c_1	c_2
下弦杆 41 杆	2 034.800 0	744.130 0	75.116 0	2.030 7	0.702 0
上弦杆 42 杆	748.160 0	399.540 0	16.401 0	-4.996 4	-2.043 0
下横梁 68 杆	164.890 0	174.490 0	9.863 4	-5.083 3	-0.092 2
上横梁 92 杆	0.984 1	6.542 1	-0.291 2	0.037 9	0.002 9
竖杆 104 杆	-0.019 1	108.470 0	2.823 2	-3.463 4	0.862 3
竖杆 51 杆	316.940 0	-72.136 0	3.346 4	10.231 0	0.009 3

表3 桁架拱结构可靠度计算成果

典型构件	构件类型	可靠指标 β	失效概率 P_f
下弦杆 41 杆	预应力轴拉	6.782 4	5.91×10^{-12}
上弦杆 42 杆	小偏心受压	4.473 2	3.85×10^{-6}
下横梁 68 杆	大偏心受拉	4.120 7	1.19×10^{-5}
上横梁 92 杆	大偏心受拉	4.249 6	1.07×10^{-5}
竖杆 104 杆	大偏心受拉	4.374 2	6.10×10^{-6}
竖杆 51 杆	大偏心受压	4.454 6	4.20×10^{-6}

从上述对不同受力状态典型构件的可靠度分析,可以得到以下一些结论:

a. 所选典型构件代表了桁架拱结构所有位置处的构件,反映了桁架拱结构主要的受力状态,因此它们的可靠指标及失效概率即为桁架拱可靠度量度的依据.桁架拱结构为Ⅰ级水工建筑物,在文献[5]中给定其目标可靠指标:对延性构件, $\beta_T = 3.7$;对脆性构件, $\beta_T = 4.2$.本结构最小可靠指标发生在下横梁,其 $\beta = 4.1207$,相应的失效概率 $P_f = 1.18887 \times 10^{-5}$,其他 β 值都大于4.2,但下横梁为大偏心受拉构件,属延性破坏,因此认为该结构的可靠指标均大于目标可靠指标的要求,设计是满足要求的,且具有一定的安全度储备.

b. 下横梁、上横梁和竖杆虽然位于结构的不同部位,且属不同的受力状态构件,但其 β 值相差不大,大体都在 4.28 ± 0.17 范围内变化,这也证明了水工钢

表1 随机变量的统计特征

统计参数	风荷载 $W/(kN \cdot m^{-1})$	槽中水深 H/m	抗力 $R/(kN \cdot m)$					
			下弦杆 41 杆	上弦杆 42 杆	下横梁 68 杆	上横梁 92 杆	竖杆 104 杆	竖杆 51 杆
平均值	1.200	5.030	12 432.3	5 923.84	1 152.06	68.06	917.85	396.24
标准差	0.231 6	0.251 5	1 330.26	1 036.67	172.81	10.21	137.68	50.72

注:除风荷载分布类型为极值Ⅰ型外,其余均为对数正态分布.

钢筋混凝土结构规定统一的目标可靠指标的可行性.

c. 下弦杆的可靠指标偏高 ,这一方面是由于老规范对预应力混凝土构件的安全系数 K 的取值略高于一般混凝土构件 ,另一方面在进行抗力统计时 ,根据已有的资料 ,尚不能很好地确定预应力结构抗力的有关参数统计 ,只好参考一般钢筋混凝土轴心受拉构件的统计参数 ,这可能也造成了可靠指标计算的出入 .但这也从另一个侧面反映了目标可靠指标和安全系数 K 之间的一些联系 .

5 结 语

本文对南水北调中线工程中较广泛采用的预应力下承式桁架拱渡槽 ,采用空间杆系有限元和响应面法分析了桁架拱结构的可靠度 .计算结果表明 ,结构达到了目标可靠指标的要求 ,是安全可靠的 .对于这类极限状态方程为随机变量的非线性隐式函数的复杂结构 ,采用响应面法分析其结构可靠度 ,能够利用现有的有限元分析程序 ,运用较成熟的 JC 法来求解 ,计算简便实用 ,且能满足工程精度的要求 .

南水北调中线工程是一个宏伟复杂的水利工

程 ,对渡槽这类复杂结构的可靠度 ,本文也只是做了一个初步的分析 .在响应面函数的改进和优化、可靠度算法和确定性有限元程序之间的接口技术、渡槽的系统可靠度、调水工程重要建筑物之间的相关关系以及调水工程与人文环境之间的关联性研究 ,都还有许多工作要做 .

参考文献 :

[1] SDL20-78 ,水工钢筋混凝土结构设计规范〔试行〕[S].
[2]朱以文 ,韦庆如 ,顾伯达 .微机有限元前后处理系统 Vizi CAD 及其应用[M].北京 :科学技术文献出版社 ,1993 .
[3]赵国藩 ,金伟良 ,贡金鑫 .结构可靠度理论[M].北京 :中国建筑工业出版社 ,2000 .
[4]赵国藩 .工程结构可靠性理论与应用[M].大连 :大连理工大学出版社 ,1996 .
[5]GB50199-94 ,水利水电工程结构可靠度设计统一标准 [S].
[6]能源部 ,水利部水利水电规划设计总院《水利水电工程结构可靠度设计统一标准》编制组 .水利水电工程结构可靠度设计统一标准专题文集[C].成都 :四川科学技术出版社 ,1994 .

(收稿日期 2004-03-15 编辑 :熊水斌)

·小资料·

我国现有装机容量 25 万 kW 以上的大型水电站

省、市(自治区)	已建成的大型水电站	在建中的大型水电站	电站数/座
辽 宁	水 丰		0.5
吉 林	丰满、云峰、白山、老虎哨	白山抽水蓄能	3
黑龙江	莲 花	尼尔基	1.5
北 京	十三陵抽水蓄能		1
河 北	潘家口抽水蓄能	张河湾抽水蓄能	2
山 西	万家寨	西龙池抽水蓄能	1.5
内蒙古	万家寨	尼尔基	1
山 东		泰安抽水蓄能	1
江 苏		宜兴抽水蓄能	1
浙 江	新安江、富春江、紧水滩、湖南镇、天荒坪抽水蓄能	桐柏抽水蓄能	6
安 徽		琅琊山抽水蓄能	1
福 建	沙溪口、水口、棉花滩	周 宁	4
河 南	三门峡、小浪底		2
湖 北	丹江口、葛洲坝、隔河岩、高坝洲	三峡、黄龙滩扩建、水布垭	7
湖 南	柘溪、凤滩、东江、五强溪、凌津滩、江垭		6
江 西	万安、柘林		2
广 东	新丰江、广州抽水蓄能		2
广 西	大化、岩滩、天生桥一级、天生桥二级	百色、龙滩、平滩、乐滩、岩滩扩建、长洲	7.5
重 庆	江 口	彭 水	2
四 川	龚嘴、桐街子、宝珠寺、太平驿、二滩	福堂、紫坪铺、瓦屋山、瀑布沟	9
云 南	鲁布革、漫湾、大朝山	小 湾	3.5
贵 州	乌江渡、鲁布革、东风、天生桥一级、天生桥二级、引子渡	洪家渡、索风营、平班、构皮滩、三板溪	9
陕 西	安 康		1
甘 肃	盐锅峡、刘家峡、碧口、大峡		4
青 海	龙羊峡、李家峡	公伯峡	3
宁 夏	青铜峡		1
新 疆		吉林台	1

注 :①跨国界及跨省、市(自治区)的水电站均各按 0.5 座计算 ;②为避免重复计算 ,在建中的白山抽水蓄能和岩滩扩建未计入电站数内。
(吴冀高供稿)