

# 钢管初应力影响系数因素分析及计算方法

解威威<sup>1</sup>, 叶志权<sup>1</sup>, 唐睿楷<sup>1</sup>, 谭秋虹<sup>2\*</sup>

(1. 广西路桥工程集团有限公司, 广西 南宁 530011; 2. 广西大学 土木建筑工程学院  
工程防灾与结构安全教育部重点实验室)

**摘要:**钢管初应力对钢管混凝土(CFST)拱桥受力性能影响显著,该文基于试验数据库开展了钢管初应力影响系数因素分析,建立了高精度的计算公式。首先,收集建立了考虑钢管初应力影响的CFST柱承载力试验数据库,数据库包含35组轴心受压构件和42组偏心受压构件;进而,对计算得到的钢管初应力影响系数试验值进行归一化处理,分析长细比、偏心率、钢管初应力度度的影响程度,确定主要影响因素及其变化规律;最后,基于归一化钢管初应力影响系数试验结果,对比了3种主要计算公式的精度和稳定性,并在此基础上建立了偏于安全的修正公式。研究结果表明:对钢管初应力影响系数进行归一化处理能够避免多因素的耦合影响及无初应力CFST构件承载力计算误差带来的影响;钢管初应力度是影响钢管初应力影响系数的最主要因素,当钢管初应力度大于0.6时影响程度超过10%;当前规范给出的计算公式整体偏于危险,其中JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》精度最高,该文建立的修正公式偏于安全且精度和稳定性均高于当前规范,能够用于钢管初应力影响分析。

**关键词:** 钢管混凝土拱桥; 钢管初应力; 影响系数; 初应力度; 计算公式

钢管混凝土(CFST)拱桥先架设钢管拱肋节段,合龙后再灌注管内混凝土,因此在钢管和混凝土共同受力之前,钢管需要承受自重、混凝土湿重以及施工荷载等,产生钢管的初应力,初应力的存在缩短了钢管的弹性段,使得钢管提前进入弹塑性段,进而增大拱桥的变形、降低其整体承载能力,当前通过定义钢管初应力影响系数反映钢管初应力对于CFST拱桥承载能力的影响,不同规范和学者虽然对钢管初应力影响系数有不同的称呼,例如钢管初应力折减系数、钢管初应力度影响系数、承载力影响系数等,但其物理本质相同,都是反映钢管初应力对CFST构件承载力的降低效应,这里统一称之为钢管初应力影响系数。

围绕钢管初应力影响,韩林海等、Xiong和Zha、陈宝春等、Liew和Xiong、Li等、黄福云等、Patel等开展了大量的试验和数值模拟研究,分析了受力状态、材料参数和几何参数对钢管初应力影响系数的影响规律,初步研究结果表明:钢管初应力对CFST构件极限承载力有着不可忽略的影响,尤其是对长细比较大的

情况,影响幅度可能超过20%,拱桥长细比一般较大,因此需要合理考虑钢管初应力的影响。

然而,当前中国两本CFST拱桥规范中给出的钢管初应力折减系数有较大差别,GB 50923—2013《钢管混凝土拱桥技术规范》考虑了长细比、偏心率、钢管初应力度度的影响,但并未对钢管初应力最大值进行限制;而JTG/T D65—06—2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》在条文说明中指出,构件长细比对初应力影响较小,不予考虑,并在此基础上提出了钢管最大初应力和初应力度计算公式,以及钢管初应力度折减系数,其中计算式中仅考虑了钢管初应力度,且对钢管初应力度最大值进行了限制,不超过0.65,因此,有必要基于试验数据,研究因素的影响程度,并在此基础上对比规范公式的准确性,以指导工程设计及评估。该文通过对试验结果进行归一化处理,开展参数分析,并对当前规范给出的计算公式的精度,研究成果可为工程提供参考。

收稿日期:2020-06-01(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(编号:51738004);交通运输行业重点科技项目(编号:2018-MS1-003);广西科技重大专项(编号:桂科AA18118055);中国博士后科学基金资助项目(编号:2020M673095)

作者简介:解威威,男,博士(后),E-mail:ww.xie@foxmail.com

\* 通信作者:谭秋虹,女,硕士,工程师,E-mail:1126669110@qq.com

1 试验数据库

模型试验是对构件真实受力状态最直观的分析方法,该文收集建立了包含 35 组轴心受压构件和 42 组偏心受压构件的试验数据库,为后续开展影响因素分析和建立计算公式奠定基础。

1.1 轴心受压构件

轴心受压构件共计 35 组,具体参数如表 1 所示,试验参数范围为钢管初应力度  $\beta=0\sim0.8$ 、钢管屈服强度  $f_y=295\sim405$  MPa、混凝土轴心抗压强度  $f_{ck}=30.8\sim120.8$  MPa、构件长细比  $\lambda=12\sim72$ 、径厚比  $D/t=27.0\sim39.8$ 、套箍系数  $\xi=0.4\sim1.5$ ,试验数据库涵盖的范围较广,具有代表性。其中:

$$\beta=\frac{\sigma_0}{f_y} \tag{1}$$

$$\lambda=4\frac{l}{D} \tag{2}$$

$$\xi=\frac{f_yA_s}{f_{ck}A_c} \tag{3}$$

式中: $\sigma_0$  为钢管初应力; $A_s$  和  $A_c$  分别为钢管和混凝土截面面积; $l$  和  $D$  分别为构件长度和直径。

1.2 偏心受压构件

偏心受压构件共计 42 组,具体参数如表 2 所示,试验参数范围为钢管初应力度  $\beta=0\sim0.8$ 、钢管屈服强度  $f_y=295\sim325$  MPa、混凝土轴心抗压强度  $f_{ck}=27.7\sim31.8$  MPa、构件长细比  $\lambda=14\sim82$ 、径厚比  $D/t=29.6\sim39.8$ 、套箍系数  $\xi=1.01\sim1.76$ ,偏心距  $e=0\sim60$  mm,偏压试验数据库同样涵盖范围较广,具有代表性。

2 参数分析

钢管初应力影响系数  $K_P$  为有钢管初应力影响的构件承载力  $N_{up}$  与无钢管初应力影响的构件承载力  $N_u$  比值,如式(4)所示, $K_P$  为无量纲量,反映了钢管初应力对构件承载力的影响, $N_u$  可以为轴压承载力或为偏压承载力。

$$K_P=\frac{N_{up}}{N_u} \tag{4}$$

根据表 1、2 中的材料参数和几何参数,结合规范公式容易求得无钢管初应力的构件承载力  $N_u$ ,进而根据  $N_{up}$  的试验结果,能够求得钢管初应力影响系数

表 1 轴心受压构件试验数据库

<i>N</i>	<i>D</i> / mm	<i>t</i> / mm	<i>l</i> / mm	<i>f<sub>y</sub></i> / MPa	<i>f<sub>ck</sub></i> / MPa	$\beta$	<i>N<sub>ut</sub></i> / kN
1	108	4.0	324	336	37.7	0.00	932
2	108	4.0	324	336	37.7	0.25	912
3	108	4.0	324	336	37.7	0.54	895
4	108	4.0	1 296	336	37.7	0.00	792
5	108	4.0	1 296	336	37.7	0.25	804
6	108	4.0	1 296	336	37.7	0.50	729
7	108	4.0	1 944	336	37.7	0.00	734
8	108	4.0	1 944	336	37.7	0.24	731
9	108	4.0	1 944	336	37.7	0.48	702
10	219	6.3	708	300	30.8	0.25	3 677
11	219	6.3	708	300	92.0	0.00	5 410
12	219	6.3	708	300	91.1	0.25	4 667
13	219	6.3	1 728	405	37.0	0.29	3 648
14	219	6.3	1 728	405	83.9	0.00	4 977
15	219	6.3	1 728	405	96.6	0.29	5 278
16	219	6.3	1 728	405	120.8	0.37	5 437
17	219	6.3	3 078	393	41.0	0.28	3 160
18	219	6.3	3 078	393	84.8	0.00	4 204
19	219	6.3	3 078	393	94.7	0.28	4 580
20	219	6.3	3 078	393	107.6	0.36	4 827
21	159	4.0	636	295	31.8	0.00	1 450
22	159	4.0	636	295	31.8	0.20	1 385
23	159	4.0	636	295	31.8	0.40	1 340
24	159	4.0	636	295	31.8	0.60	1 425
25	159	4.0	636	295	31.8	0.80	1 331
26	159	4.0	1 590	295	31.8	0.00	1 305
27	159	4.0	1 590	295	31.8	0.20	1 133
28	159	4.0	1 590	295	31.8	0.40	945
29	159	4.0	1 590	295	31.8	0.60	1 254
30	159	4.0	1 590	295	31.8	0.80	971
31	159	4.0	2 544	295	31.8	0.00	1 198
32	159	4.0	2 544	295	31.8	0.20	1 130
33	159	4.0	2 544	295	31.8	0.40	1 140
34	159	4.0	2 544	295	31.8	0.60	1 020
35	159	4.0	2 544	295	31.8	0.80	948

的试验值  $K_{Pt}$ ,并据此分析各个参数对  $K_{Pt}$  的影响规律,确定主要影响因素及影响程度。

2.1 数据归一化处理

为使数据具有可比性,避免其余因素的耦合影响,对各组  $K_{Pt}$  进行归一化处理,得到归一化钢管初应力影响系数  $\bar{K}_{Pt}$ ,例如,当分析钢管初应力的影响时,以

表 2 偏心受压构件试验数据库

$N$	$D/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$e/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$f_y/\text{MPa}$	$f_{ck}/\text{MPa}$	$\beta$	$N_{ut}/\text{kN}$
1	159	4.0	30	636	295	31.8	0.60	910
2	159	4.0	30	1 113	295	31.8	0.60	890
3	159	4.0	30	1 590	295	31.8	0.60	690
4	159	4.0	30	2 067	295	31.8	0.60	670
5	159	4.0	30	2 544	295	31.8	0.60	620
6	159	4.0	0	636	295	31.8	0.60	1 425
7	159	4.0	15	636	295	31.8	0.60	1 135
8	159	4.0	30	636	295	31.8	0.60	910
9	159	4.0	45	636	295	31.8	0.60	648
10	159	4.0	30	636	295	31.8	0	1 010
11	159	4.0	30	636	295	31.8	0.20	990
12	159	4.0	30	636	295	31.8	0.40	950
13	159	4.0	30	636	295	31.8	0.60	910
14	159	4.0	30	636	295	31.8	0.80	835
15	159	4.0	0	2 544	295	31.8	0.60	1 020
16	159	4.0	15	2 544	295	31.8	0.60	710
17	159	4.0	30	2 544	295	31.8	0.60	620
18	159	4.0	45	2 544	295	31.8	0.60	486
19	159	4.0	30	2 544	295	31.8	0.60	750
20	159	4.0	30	2 544	295	31.8	0	665
21	159	4.0	30	2 544	295	31.8	0.20	600
22	159	4.0	30	2 544	295	31.8	0.40	620
23	159	4.0	30	2 544	295	31.8	0.80	608
24	133	4.5	50	465	325	27.7	0	600
25	133	4.5	50	465	325	27.7	0.21	591
26	133	4.5	50	465	325	27.7	0.30	576
27	133	4.5	50	465	325	27.7	0.39	582
28	133	4.5	50	465	325	27.7	0.43	576
29	133	4.5	50	465	325	27.7	0.48	568
30	133	4.5	50	465	325	27.7	0.60	559
31	133	4.5	60	465	325	27.7	0.42	500
32	133	4.5	60	465	325	27.7	0.57	492
33	133	4.5	50	1 670	325	27.7	0	438
34	133	4.5	50	1 670	325	27.7	0.22	430
35	133	4.5	50	1 670	325	27.7	0.42	416
36	133	4.5	50	1 670	325	27.7	0.58	412
37	133	4.5	60	1 670	325	27.7	0.23	347
38	133	4.5	60	1 670	325	27.7	0.42	335
39	133	4.5	60	2 730	325	27.7	0	306
40	133	4.5	60	2 730	325	27.7	0.22	293
41	133	4.5	60	2 730	325	27.7	0.41	282
42	133	4.5	60	2 730	325	27.7	0.59	268

钢管初应力度  $\beta=0$  的试验结果作为基准值 1, 可以避免  $N_u$  计算误差的影响, 同时对数据进行分组, 将单一参数变化的几个数据作为一组, 可以避免不同因素之间的耦合影响, 从而保证影响规律分析的客观性, 并得到具有普遍适用性的规律。

## 2.2 钢管初应力度影响

从数据库选取只变化钢管初应力度数据, 共计 49 个, 其中轴心受压构件 24 个, 偏心受压构件 25 个, 分为 11 组, 结果如图 1 所示。由图 1 可见: 无论是轴心受压还是偏心受压, 钢管初应力度对归一化钢管初应力影响系数均有较大影响, 随着钢管初应力度增大, 归一化钢管初应力影响系数呈减小趋势, 即钢管初应力度越大, 钢管初应力的影响越大, 大部分试验数据集中在  $\beta \leq 0.6$ , 此时, 钢管初应力度对构件承载力的降低幅度整体小于 10%, 因此 JTG/T D65-06-2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》将钢管初应力度限制为  $\leq 0.65$  能够基本保证承载力降低幅度小于 10%, 而当钢管初应力度达到 0.8 时, 构件承载力降低显著, 甚至超过 20%, 因此必须对钢管初应力度进行合理限制。

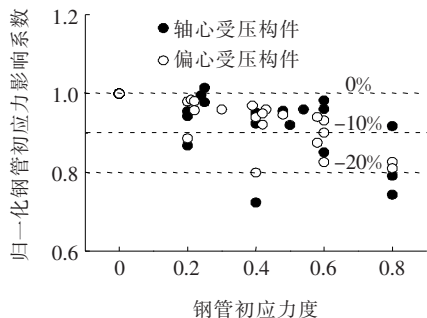


图 1 钢管初应力度影响规律

## 2.3 长细比影响

从数据库选取只变化长细比的数据, 共计 38 个, 其中轴心受压构件 23 个, 偏心受压构件 15 个, 分为 15 组, 结果如图 2 所示。

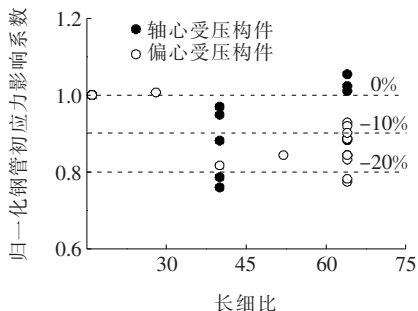


图 2 长细比影响规律

由图 2 可见: 长细比对归一化钢管初应力影响系

数有较大影响, 但变化规律不是特别明显, 离散性较大, 整体上随着长细比增大, 归一化钢管初应力影响系数呈减小趋势, 即长细比越大, 钢管初应力的影响越大, 这是符合钢管初应力影响机理的, 长细比越大, 钢管初应力作用阶段构件的变形越大, 附加力效应越显著。

## 2.4 偏心率影响

从数据库选取只变化偏心率的数据, 共计 10 个, 分为两组, 结果如图 3 所示。

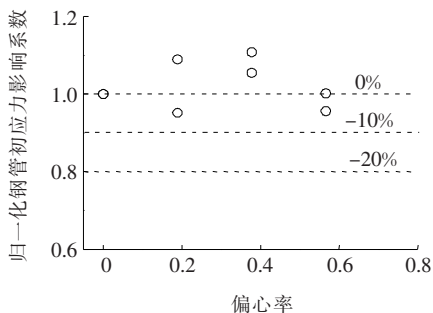


图 3 偏心率影响规律

由图 3 可见: 偏心率对归一化钢管初应力影响系数影响规律不明显, 数据量较少, 结果离散性较大, 无法得出准确的影响规律, 后续建议补充更多的只针对偏心率的试验。

## 3 计算公式对比研究

### 3.1 现有计算公式

张晓庆等给出的计算公式无法直接提取钢管初应力影响系数, 这里不纳入讨论范围; 李艳等给出的计算公式中系数  $k$  和  $b$  只给出了取值范围, 没有确定值, 无法计算; 同时, 陈宝春和黄福云等针对轴压和偏压受力情况分别给出了钢管初应力影响系数的计算公式, 同时在文献中指出, GB 50923-2013《钢管混凝土拱桥技术规范》中的计算公式是文献[16]的简化公式, 本源相同, 因此这里不再对文献[9, 10, 16]中的具体公式开展对比分析, 统一以拱桥国标给出的简化公式作为代表成果开展对比分析。

综合以上分析, 将现有计算公式分为 3 类:

(1) GB 50923-2013《钢管混凝土拱桥技术规范》

GB 50923-2013 规范将钢管初应力影响系数  $K_P$  称为钢管初应力度影响系数:

$$K_P = 1 - 0.24am\beta \quad (5)$$

式中:  $a$  为考虑长细比影响的系数;  $m$  为考虑偏心率的影响系数;  $\beta$  为钢管初应力度, 且有:

$$a=\frac{\lambda}{80} \tag{6}$$

$$m=0.2\rho+0.98 \tag{7}$$

式中: $\lambda$  为构件长细比; $\rho$  为构件偏心率。

(2) JTG/T D65-06-2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》

JTG/T D65-06-2015 规范将钢管初应力影响系数  $K_P$  称为钢管初应力折减系数,且与 GB 50923-2013 规范不同的是,JTG/T D65-06-2015 规范给出的钢管初应力影响系数表达式相对简单,仅考虑了初应力度的影响:

$$K_P=1-0.15\beta_d \tag{8}$$

式中: $\beta_d$  为钢管初应力度,JTG/T D65-06-2015 规范规定其值不应超过 0.65,采用钢管强度设计值计算:

$$\beta_d=\frac{\sigma_0}{f_{sd}} \tag{9}$$

式中: $\sigma_0$  为主拱钢管截面最大初应力值; $f_{sd}$  为钢管强度设计值。

(3) DBJ/T 13-51-2010《钢管混凝土结构技术规程》

DBJ/T 13-51-2010 为福建省地方规程,计算公式来源于韩林海等的研究成果:

$$K_P=1-f(\lambda_n) \cdot f(e/r) \cdot \beta_0 \tag{10}$$

式中: $f(\lambda_n)$  为长细比影响系数; $f(e/r)$  为偏心率影响系数; $\beta_0$  为钢管初应力系数,与该文定义的钢管初应力度相差一个钢管稳定系数,且有:

$$f(\lambda_n)=\begin{cases} 0.17\lambda_n-0.02 & \lambda_n\leqslant 1 \\ -0.13\lambda_n^2+0.35\lambda_n-0.07 & \lambda_n>1 \end{cases} \tag{11}$$

$$f(e/r)=\begin{cases} 0.75(e/r)^2-0.05(e/r)+0.9 & e/r\leqslant 0.4 \\ -0.15(e/r)+1.06 & e/r>0.4 \end{cases} \tag{12}$$

$$\beta_0=\frac{\sigma_0}{\varphi_s f_{sd}} \tag{13}$$

式中: $\lambda_n$  为计算系数, $\lambda_n=\lambda/80$ ;  $e/r$  为偏心率; $\varphi_s$  为空钢管构件的稳定系数。

3.2 计算结果对比

如果直接利用 3.1 节给出的钢管初应力影响系数计算 CFST 构件的承载力,并与试验结果进行对比,可能会带来错误的结论,主要原因在于无初应力的 CFST 构件承载力计算公式本身存在误差,因此无法判别承载力偏差是来源于钢管初应力影响系数还是无初应力 CFST 构件承载力计算公式,目前根据承载力结果分析钢管初应力影响系数的做法在文献中被广泛应用,为此,该文将试验数据进行分组,以保持其余因素不变只改变钢管初应力度的试验数据作为一组,并以钢管初应力度为 0 的试验结果作为基准,计算出不同初应力度下钢管初应力影响系数,也就是前文提到的归一化钢管初应力影响系数  $\bar{K}_{Pt}$ ,对比结果如表 3 所示。

由表 3 可以看出:GB 50923-2013 和 DBJ/T 13-51-2010 虽然综合考虑了长细比、偏心率的影响,但整体的计算精度均略差于 JTG/T D65-06-2015,且 JTG/T D65-06-2015 计算结果的变异系数最小,计算结果最稳定,而 JTG/T D65-06-2015 计算公式中仅考虑了钢管初应力度,这也一定程度表明,钢管初应力度是影响钢管初应力影响系数的最主要因

表 3 归一化钢管初应力影响系数对比

组数	$\lambda$	$\beta$	$e/r$	$N_{ut}/$ kN	$\bar{K}_{Pt}$	GB 50923-2013		JTG/T D65-06 -2015		DBJ/T 13-51 -2010		该文新建	
						$\bar{K}_{Pc1}$	$\bar{K}_{Pc1}/\bar{K}_{Pt}$	$\bar{K}_{Pc2}$	$\bar{K}_{Pc2}/\bar{K}_{Pt}$	$\bar{K}_{Pc3}$	$\bar{K}_{Pc3}/\bar{K}_{Pt}$	$\bar{K}_{Pc4}$	$\bar{K}_{Pc4}/\bar{K}_{Pt}$
1	16	0.00	0.38	1 010	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	16	0.20	0.38	990	0.98	0.99	1.01	0.97	0.99	1.00	1.02	0.96	0.98
	16	0.40	0.38	950	0.94	0.98	1.04	0.94	1.00	0.99	1.06	0.92	0.98
	16	0.60	0.38	910	0.90	0.97	1.08	0.91	1.01	0.99	1.10	0.88	0.98
	16	0.80	0.38	835	0.83	0.96	1.16	0.88	1.06	0.99	1.20	0.84	1.02
2	64	0.00	0.38	750	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	64	0.20	0.38	665	0.89	0.96	1.08	0.97	1.09	0.97	1.10	0.96	1.08
	64	0.40	0.38	600	0.80	0.92	1.15	0.94	1.18	0.95	1.19	0.92	1.15
	64	0.60	0.38	620	0.83	0.88	1.06	0.91	1.10	0.92	1.12	0.88	1.06
	64	0.80	0.38	608	0.81	0.84	1.03	0.88	1.09	0.90	1.11	0.84	1.04

续表 3

组数	$\lambda$	$\beta$	$e/r$	$N_{ut}/$ kN	$\bar{K}_{Pr}$	GB 50923—2013		JTG/T D65—06 —2015		DBJ/T 13—51 —2010		该文新建	
						$\bar{K}_{Pc1}$	$\bar{K}_{Pc1}/\bar{K}_{Pt}$	$\bar{K}_{Pc2}$	$\bar{K}_{Pc2}/\bar{K}_{Pt}$	$\bar{K}_{Pc3}$	$\bar{K}_{Pc3}/\bar{K}_{Pt}$	$\bar{K}_{Pc4}$	$\bar{K}_{Pc4}/\bar{K}_{Pt}$
3	14	0.00	0.75	600	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	14	0.21	0.75	591	0.99	0.99	1.01	0.97	0.98	1.00	1.01	0.96	0.97
	14	0.30	0.75	576	0.96	0.99	1.03	0.96	0.99	1.00	1.04	0.94	0.98
	14	0.39	0.75	582	0.97	0.98	1.01	0.94	0.97	1.00	1.03	0.92	0.95
	14	0.43	0.75	576	0.96	0.98	1.02	0.94	0.97	1.00	1.04	0.91	0.95
	14	0.48	0.75	568	0.95	0.98	1.03	0.93	0.98	1.00	1.05	0.90	0.95
	14	0.60	0.75	559	0.93	0.97	1.04	0.91	0.98	0.99	1.07	0.88	0.94
4	50	0.00	0.75	438	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	50	0.22	0.75	430	0.98	0.96	0.98	0.97	0.98	0.98	1.00	0.96	0.97
	50	0.42	0.75	416	0.95	0.93	0.98	0.94	0.99	0.96	1.01	0.92	0.96
	50	0.58	0.75	412	0.94	0.90	0.96	0.91	0.97	0.95	1.01	0.88	0.94
5	82	0.00	0.90	306	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	82	0.22	0.90	293	0.96	0.94	0.98	0.97	1.01	0.96	1.01	0.96	1.00
	82	0.41	0.90	282	0.92	0.88	0.96	0.94	1.02	0.93	1.01	0.92	1.00
	82	0.59	0.90	268	0.88	0.83	0.95	0.91	1.04	0.90	1.03	0.88	1.01
6	12	0.00	0.00	932	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	12	0.25	0.00	912	0.98	0.99	1.01	0.96	0.98	1.00	1.02	0.95	0.97
	12	0.54	0.00	895	0.96	0.98	1.02	0.92	0.96	1.00	1.04	0.89	0.93
7	48	0.00	0.00	792	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	48	0.25	0.00	804	1.02	0.96	0.95	0.96	0.95	0.98	0.97	0.95	0.94
	48	0.50	0.00	729	0.92	0.93	1.01	0.93	1.00	0.96	1.04	0.90	0.98
8	72	0.00	0.00	734	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	72	0.24	0.00	731	1.00	0.95	0.95	0.96	0.97	0.97	0.97	0.95	0.96
	72	0.48	0.00	702	0.96	0.90	0.94	0.93	0.97	0.93	0.98	0.90	0.95
9	16	0.00	0.00	1 450	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	16	0.20	0.00	1 385	0.96	0.99	1.04	0.97	1.02	1.00	1.04	0.96	1.01
	16	0.40	0.00	1 340	0.92	0.98	1.06	0.94	1.02	0.99	1.08	0.92	1.00
	16	0.60	0.00	1 425	0.98	0.97	0.99	0.91	0.93	0.99	1.01	0.88	0.90
	16	0.80	0.00	1 331	0.92	0.96	1.05	0.88	0.96	0.99	1.08	0.84	0.92
10	40	0.00	0.00	1 305	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	40	0.20	0.00	1 133	0.87	0.98	1.12	0.97	1.12	0.99	1.14	0.96	1.11
	40	0.40	0.00	945	0.72	0.95	1.32	0.94	1.30	0.98	1.35	0.92	1.27
	40	0.60	0.00	1 254	0.96	0.93	0.97	0.91	0.95	0.96	1.00	0.88	0.92
	40	0.80	0.00	971	0.75	0.91	1.22	0.88	1.18	0.95	1.28	0.84	1.13
11	64	0.00	0.00	1 198	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	64	0.20	0.00	1 130	0.94	0.96	1.02	0.97	1.03	0.98	1.04	0.96	1.02
	64	0.40	0.00	1 140	0.95	0.92	0.97	0.94	0.99	0.95	1.00	0.92	0.97
	64	0.60	0.00	1 020	0.85	0.89	1.04	0.91	1.07	0.93	1.09	0.88	1.03
	64	0.80	0.00	948	0.79	0.85	1.07	0.88	1.11	0.91	1.15	0.84	1.06
均值						1.027		1.018		1.050		0.999	
变异系数						0.067		0.066		0.072		0.064	



素,仅考虑钢管初应力度的计算公式能够基本适用常见的长细比和偏心率情况。

### 3.3 修正计算公式

由表3可以看出:当前规范中钢管初应力影响系数计算结果整体偏于危险,且计算精度仍有进一步改进的空间,为此该在JTG/T D65-06-2015的基础上,考虑钢管初应力度的影响,通过回归分析建立偏保守的计算公式:

$$K_p = 1 - k_1 \beta \quad (14)$$

式中: $k_1$ 为待定系数,通过回归分析确定。

利用最小二乘法容易确定 $k_1$ 的取值为0.2,拟合的残差均方差为0.053,残差平方和为0.137,具有较高的拟合精度。修正公式与试验数据点的对比如图4所示。由图4可见,该文新建公式相比于JTG/T D65-06-2015斜率更大,能够穿过大部分数据点。具体结果对比如表3所示,由表3可见,该文新建公式计算结果与试验结果相比,均值为0.999,变异系数为0.064,整体偏于安全,且计算精度最高,变异系数最小。

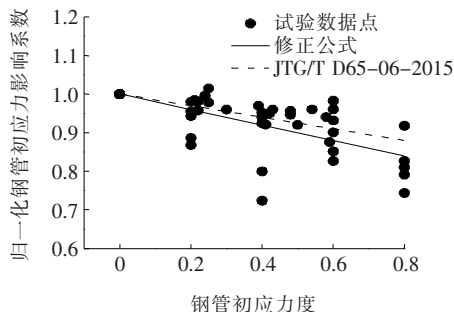


图4 修正公式与规范公式对比

## 4 结论

搜集建立了包含77组构件的试验数据库,通过对钢管初应力影响系数进行归一化处理,分析了主要因素的影响规律,并对比了当前主要计算公式,建立了修正公式,研究结果表明:

(1) 数据库涵盖了不同受力情况,且材料参数和几何参数变化范围广,具有代表性。

(2) 基于试验数据的归一化处理,能够避免多因素的耦合及无初应力CFST构件承载力计算误差带来的影响,有利于揭示钢管初应力影响系数的真实变化规律。

(3) 钢管初应力度是钢管初应力影响系数的主要因素,钢管初应力度超过0.6时,构件承载力降低幅度

超过10%,而长细比和偏心率虽然有一定影响,但数据整体离散性较大,规律不清晰。

(4) 当前规范给出的公式计算误差普遍不超过5%,但整体偏于危险,其中JTG/T D65-06-2015《公路钢管混凝土拱桥设计规范》精度最高,误差仅1.8%,相比之下该文建立的修正公式更加安全可靠,能够为工程设计和评估提供参考。

### 参考文献:

- [1] 苏湘华,杨占峰.真空辅助灌注技术+自密实无收缩混凝土在CFST拱桥中的应用[J].中外公路,2019(4).
- [2] JTG/T D65-06-2015 公路钢管混凝土拱桥设计规范[S].
- [3] GB 50923-2013 钢管混凝土拱桥技术规范[S].
- [4] 韦建刚,黄福云,陈宝春.初应力对钢管混凝土单圆管拱极限承载力影响的研究[J].工程力学,2010(7).
- [5] 周水兴,张敏,王小松.钢管初应力对钢管砼拱桥承载力影响非线性分析[J].计算力学学报,2010(2).
- [6] 韩林海,尧国皇.钢管初应力对钢管混凝土压弯构件承载力的影响研究[J].土木工程学报,2003(4).
- [7] Han LH, Yao GH. Behaviour of Concrete-Filled Hollow Structural Steel (HSS) Columns with Pre-Load on the Steel Tubes[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(12): 1455-1475.
- [8] Xiong DX, Zha XX. A Numerical Investigation on the Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubular Columns Under Initial Stresses[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(5): 599-611.
- [9] 陈宝春,黄福云.有初应力的钢管混凝土偏压构件极限承载力计算[J].长沙交通学院学报,2008(2).
- [10] 陈宝春,黄福云.有初应力的钢管混凝土轴压柱设计计算方法研究[J].福州大学学报(自然科学版),2008(4).
- [11] Liew JYR, Xiong DX. Effect of Preload on the Axial Capacity of Concrete-Filled Composite Columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(3): 709-722.
- [12] Li W, Han LH, Zhao XL. Axial Strength of Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular (CFDST) Columns with Preload on Steel Tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 56(4): 9-20.
- [13] 黄福云,陈宝春,李建中,等.有初应力的钢管混凝土格构柱轴压试验研究[J].建筑结构学报,2013(11).
- [14] Patel VI, Liang QQ, Hadi MNS. Behavior of Biaxially-Loaded Rectangular Concrete-Filled Steel Tubular Slender Beam-Columns with Preload Effects[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 79(2).

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2020.05.014

# 大跨钢箱梁斜拉桥施工期结构参数敏感性分析

张亚海<sup>1</sup>, 朱斌<sup>2</sup>, 郭宝圣<sup>1</sup>, 南飞<sup>1</sup>, 鲁乃唯<sup>3\*</sup>

(1. 中交路桥华东工程有限公司, 上海市 201210; 2. 江西省交通运输科学研究院有限公司; 3. 长沙理工大学 土木工程学院)

**摘要:**为了识别大跨斜拉桥施工期结构参数对其力学性能的影响,开展了主跨 760 m 钢箱梁斜拉桥施工期的有限元数值模拟与构件参数无量纲敏感性分析。研究了拉索弹性模量、主梁重度、主梁刚度及索塔刚度等设计参数对全桥线形、内力的影响。结果表明:基于无量纲参数敏感性分析方法可识别出大跨度钢箱梁斜拉桥结构响应随设计参数的变化规律;拉索弹性模量、主梁重量是影响结构变形、结构内力的主要设计参数;拉索弹性模量对拉索索力的影响最大,为重要影响参数,而索塔与主梁的刚度是可忽略影响参数。基于结构参数的敏感性分析结果可掌握影响斜拉桥结构力学性能与安全性的主要参数,为结构优化设计与施工控制奠定基础。

**关键词:**斜拉桥; 施工期; 设计参数; 有限元分析; 敏感性分析

近年来,国内外建设了一批特大跨斜拉桥,如著名的荆岳长江大桥、苏通大桥等。随着斜拉桥主梁跨度的增加,钢箱梁结构逐步替代混凝土主梁,从而突显了钢箱梁斜拉桥在超大跨度桥型中的竞争优势。由于斜拉桥超静定次数较高,非线性显著,结构体系较为复杂,各构件设计参数合理匹配方能使得结构体系性能

最优。通过结构参数的敏感性分析可掌握影响斜拉桥结构力学性能与安全性的主要参数,为结构优化设计与施工控制奠定基础。

国内外学者采用数值模拟与试验方法研究了钢箱梁斜拉桥的设计敏感参数。黄灿采用几何控制法对苏通大桥进行单因素敏感性分析,确定影响特大跨度斜

- \*\*\*\*\*
- [15] 杜新喜,蔡宗洋,程晓燕,等. 荷载下内填混凝土加固钢管构件轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015 (S2).
- [16] Huang FY, Yu XM, Chen BC, et al. Study on Preloading Reduction of Ultimate Load of Circular Concrete-Filled Steel Tubular Columns[J]. Thin-Walled Structures, 2016, 98: 454-464.
- [17] 查晓雄,钟善桐. 钢管初应力对钢管混凝土压弯、压弯扭构件工作性能的影响[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997 (2).
- [18] 张晓庆,钟善桐,闫善章,等. 初应力对钢管混凝土偏压构件承载力影响的实验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1997(1).
- [19] 胡锐,杜新喜,蔡宗洋,等. 荷载下内填混凝土加固钢管构件偏压性能试验研究[J]. 工业建筑, 2017(2).
- [20] GB 50936-2014 钢管混凝土结构设计规范[S].
- [21] 李艳,赵均海,梁文彪,等. 考虑初应力的钢管混凝土柱轴压承载力统一解[J]. 土木建筑与环境工程, 2013(3).
- [22] 黄福云,韦建刚,陈宝春. 有初应力的钢管混凝土柱承载力的计算方法比较[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2009(6).
- [23] Huang FY, Yu X, Chen BC. The Structural Performance of Axially Loaded CFST Columns under Various Loading Conditions[J]. Steel & Composite Structures, 2012, 13(5): 451-471.
- [24] 童栋华,余敏,鲍浩,等. 多级加载对圆形钢管混凝土短柱轴压性能影响试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017 (S1).
- [25] DBJ/T 13-51-2010 钢管混凝土结构技术规程[S].

收稿日期: 2019-12-06(修改稿)

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(编号: 2015CB057705); 国家自然科学基金资助项目(编号: 51908068); 湖南省自然科学基金资助项目(编号: 2018JJ3540)

作者简介: 张亚海,男,工程师。

\* 通信作者: 鲁乃唯,男,博士,副教授. E-mail: lanaiweide@163.com