

文章编号: 1002-0268 (2005) 10-0051-05

预应力混凝土箱梁腹板主应力分析

吕建鸣, 陈 可

(交通部公路科学研究所, 北京 100088)

摘要: 预应力混凝土箱型截面桥梁结构是我国桥梁工程中最常用桥型结构形式之一。已建成的此类桥梁中有不少出现了腹板开裂现象, 裂缝成因与主拉应力计算影响的因素有关。结合公路桥梁结构设计系统 GQJS 按照 JTG D62-2004 新桥规的改版工作, 讨论变高度梁弯矩轴力修正、钢筋换算截面修正以及竖向预应力等因素对箱梁腹板主应力计算的影响, 并结合实例进行分析, 对比新、旧规范在斜截面抗裂性能验算方面的不同要求。

关键词: 桥梁结构; 箱型截面; 主应力; GQJS; 抗裂性能

中图分类号: U448.21⁺3

文献标识码: A

Principal Stress Analysis for Web of PC Bridge with Box Section

LV Jian-ming, CHEN Ke

(Research Institute of Highway, The Ministry of Communication, Beijing 100088, China)

Abstract: PC Bridge with box section is one of the most popular structure types in the bridge construction in China. Some cracks had appeared on the webs of these box girder bridges. It is relative with the calculation of principal tension stress. Combining with the work of bridge structure design system (Chinese name abbr. GQJS) modified according to the new Chinese Bridge Code (JTG D62-2004), the influences of calculating factors of principal stress of web of box girder bridges are discussed, such as internal forces modification of variable height girders, conversion section of reinforcement bars and vertical prestressing force. And a practical case is analyzed to compare different requirements for crack resistance under the new Codes and old Codes.

Key words: Bridge structure; Box girder; Principle stress; GQJS; Crack resistance

我国的公路建设正处于高速发展时期, 2004 年底全国公路总里程达到 187.07 万 km, 现有桥梁总数达 32.16 万座、1 337.64 万延米。现有桥梁中预应力混凝土箱型截面连续梁和连续刚构桥梁占有相当大的比例。预应力混凝土连续梁或连续刚构桥最突出的问题是箱梁混凝土开裂, 其中腹板主拉应力裂缝严重影响结构的安全性和耐久性。裂缝的出现与设计、施工、养护、超载、环境条件等多种因素有关。而设计计算中对主拉应力的分析不够充分, 主拉应力的安全储备不足, 是其中一个主要影响因素。本文通过介绍公路桥梁结构设计系统 (以下简称 GQJS) 按 2004 年 10 月交通部发布《公路钢筋混凝土及预应力混凝土

桥涵设计规范》JTG D62-2004 (以下简称 JTG D62) 改版情况, 对主应力计算中涉及到的各项影响因素进行分析论证, 为桥梁设计人员了解主应力计算方法, 并在设计中采取措施避免箱梁开裂提供参考。

1 主应力计算要点

主应力计算与主应力计算位置截面正应力、竖向预应力以及剪应力计算直接相关。JTG D62 第 6.3.3 条规定, 预应力混凝土受弯构件由作用短期效应和预加力产生的混凝土主拉应力 σ_p 和主压应力 σ_c 应按下列公式计算

$$\frac{\sigma_p}{\sigma_c} = \frac{\sigma_x + \sigma_{cy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_{cy}}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (1)$$

收稿日期: 2005-04-16

作者简介: 吕建鸣 (1957-), 男, 北京人, 研究员, 主要研究方向为桥梁 CAD 及结构分析. (jm_lv@rioh.cn)

$$\sigma_{cx} = \frac{N_s}{A_0} + \frac{M_s y_0}{I_0} \quad (2)$$

$$\sigma_{cy} = 0.6 \frac{n \sigma'_{pe} A_{pv}}{b s_v} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{V_s S_0}{b I_0} \quad (4)$$

式中, σ_{cx} 为由主应力计算点处各种作用(如:自重、外荷载、支座沉降、体系转换、预应力、混凝土收缩及徐变等)产生的轴力 N_s 和弯矩 M_s 按材料力学公式计算的混凝土法向应力; σ_{cy} 为主应力计算点处由竖向预应力钢筋预加力产生的混凝土竖向压应力; τ 为主应力计算点预应力弯起钢筋预加力和作用短期效应组合剪力 V_s 产生的混凝土剪应力; n 为在同一截面上竖向预应力钢筋的肢数; σ'_{pe} 为竖向预应力钢筋扣除全部预应力损失后的有效预应力; A_0 为换算截面面积; y_0 为换算截面重心轴至主应力计算点处的距离; I_0 为换算截面惯性矩; S_0 为主应力计算点以上部分换算截面面积对换算截面重心轴的面积矩; b 为主应力计算点处构件腹板的宽度; A_{pv} 为单支竖向预应力钢筋的截面积; s_v 为竖向预应力钢筋的间距。

公式(2)和(4)与JTG D62公式(6.3.3-2)和(6.3.3-4)表达方式不同,公式(2)和(4)更为通用。JTG D62公式(6.3.3-4)中纵向预应力产生的剪应力要求用净截面(扣除孔道面积)面积矩和惯性矩计算,在GQJS中只要指定预应力钢筋压浆阶段大于张拉阶段,则实际效果是一样的。因为GQJS中各阶段都要计算截面几何参数,计算时要判别钢筋状态,如计算阶段在预应力钢筋压浆阶段之前则要扣除预应力钢筋孔道面积,如计算阶段在预应力钢筋压浆阶段之后则按钢筋与混凝土弹性模量比值进行面积换算。GQJS应力计算是根据应力叠加原理分阶段逐次用各阶段内力增量和该阶段换算截面几何参数计算应力增量,最终应力计算结果是各阶段应力增量累计值。

应力计算中的关键问题是截面几何参数的计算,公式(1)~(4)中 y_0 、 A_0 和 I_0 是全截面的换算截面几何参数,同一截面上每个主应力计算点处该参数不变,而 S_0 则随主应力计算点位置不同而有所不同。计算预应力混凝土连续梁或连续刚构桥时,一般全桥要划分几十个甚至几百个单元,每个单元有两个截面要计算主应力,每个截面至少要划分6个主应力计算点,分布在箱梁顶板、底板和腹板不同位置处。每一个主应力计算点计算面积矩 S_0 时,要在所有预应力

钢筋中搜索判断,找出通过主应力计算点以上部分区域的钢筋,确定钢筋所在位置,计算钢筋对换算截面重心轴的面积矩。由于主应力计算点较多,上述计算过程运算量比较大。以往受计算机容量和速度的限制,桥梁结构分析软件计算剪应力时多不考虑钢筋换算截面面积对换算截面重心轴的面积矩的影响。这样当顶板预应力钢筋配置较多时,钢筋换算截面对剪应力计算结果还是有一定影响的。

跨径稍大一些的预应力混凝土连续梁或连续刚构桥多采用变高度箱型梁结构。按照JTG D62第4.2.7条规定,计算变高度梁的剪应力时,应考虑弯矩、轴向力引起的附加剪应力。文献[5]及JTG D62条文说明中推荐弯矩、轴向力引起的附加剪应力计算公式如下

$$\tau_c = \tau + c_1 N_s + c_2 M_s \quad (5)$$

$$c_1 = \frac{1}{b} \left[\frac{S_0 A_l}{A_0 I_0} - \frac{b A_c}{A_0^2} \right] \tan \beta + \frac{1}{b} \left[\frac{S_0 A_v}{A_0 I_0} - \frac{b' A_c}{A_0^2} \right] \tan \beta' \quad (6)$$

$$c_2 = \frac{1}{b} \left[\frac{A_c A_l}{A_0 I_0} - \frac{2 S_0 S_l}{I_0^2} \right] \tan \beta + \frac{1}{b} \left[\frac{A_c A_v}{A_0 I_0} - \frac{2 S_0 S_v}{I_0^2} \right] \tan \beta' \quad (7)$$

式中, τ_c 为变高度梁考虑弯矩、轴向力引起的附加剪应力修正后的混凝土剪应力; A_c 为计算剪应力点以上部分截面面积; A_l 、 S_l 为计算截面重心轴以下部分截面面积及该面积对计算截面重心轴的面积矩; A_v 、 S_v 为计算截面重心轴以下挖空部分截面面积及该面积对计算截面重心轴的面积矩; b' 为扣除所有腹板宽度后的底板净宽度; β 为验算截面底板上缘切线与水平线的夹角; β' 为验算截面底板上缘切线与水平线的夹角。

其它参数与公式(1)~(4)的相同。公式(5)~(7)中的截面几何参数计算比较复杂,考虑钢筋挖孔及截面换算的影响时运算量比较大。在GQJS全过程设计分析对话框中,预应力计算内容可选:(1)不计算预应力及收缩徐变;(2)计算纵向预应力及收缩徐变;(3)计算纵向预应力及收缩徐变并计入竖向预应力对主拉应力的影响。剪应力计算方法可选:(1)简化算法(不计变高度梁弯矩轴力修正和钢筋换算截面修正);(2)变高度梁弯矩轴力修正;(3)钢筋换算截面修正;(4)全修正算法(既考虑变高度梁弯矩轴力修正又考虑钢筋换算截面修正)。设计计算时一般先选择不计算预应力及收缩徐变和剪应力简化算法,以便快速验证结构单元离散基本数据及其计算结果的合理性。当单元离散基本数据及其计算结果确认无误后,再调整纵向预应力钢筋有关信息并选择计

算纵向预应力及收缩徐变, 经过反复调整计算使得考虑纵向预应力及收缩徐变的计算结果符合规范要求, 最后再选择计算纵向预应力及收缩徐变并计入竖向预应力对主拉应力的影响, 同时选择剪应力计算全修正算法, 仔细计算剪应力和主应力, 通过应力云图详查结构各部位主应力是否符合规范要求。

2 算例分析

本文以一座已建成的预应力混凝土连续刚构桥设计计算数据为例, 用 GQJS 对比分析变截面预应力混凝土箱梁分别考虑变高度梁弯矩轴力修正、钢筋换算截面修正以及竖向预应力对主拉应力的影响, 并对比分析新老规范主拉应力验算标准的差别。

全桥上部结构总长 $80\text{m} + 125\text{m} + 80\text{m} = 285\text{m}$, 共分为 81 个桥面系单元。下部结构共分为 34 个非桥面系单元及 6 个支撑杆件元。其中承台以下桩基础是按群桩刚度等效变换模拟的, 其余各单元均按结构实际尺寸模拟。图 1 为主要控制计算阶段单元离散示意图, 图中只绘出左半桥, 右半桥上部结构构造及单元离散与左半桥完全对称。全桥纵向预应力钢筋 68 根, 采用 $19\phi^{S}15.2$ 及 $12\phi^{S}15.2$ 两种预应力钢绞线, $f_{pk} = 1\,860\text{MPa}$, 张拉控制应力 $1\,395\text{MPa}$ 。竖向预应力采用 $d = 32\text{mm}$ 的 $f_{pk} = 930\text{MPa}$ 精扎螺纹钢, 张拉控制应力 837MPa , 钢筋孔道偏差系数 $0.001\,5$, 锚具变形及钢筋回缩值 1mm 。竖向预应力钢筋顺桥向间距为 1m , 横桥向 2 根钢筋位于箱梁腹板中心。

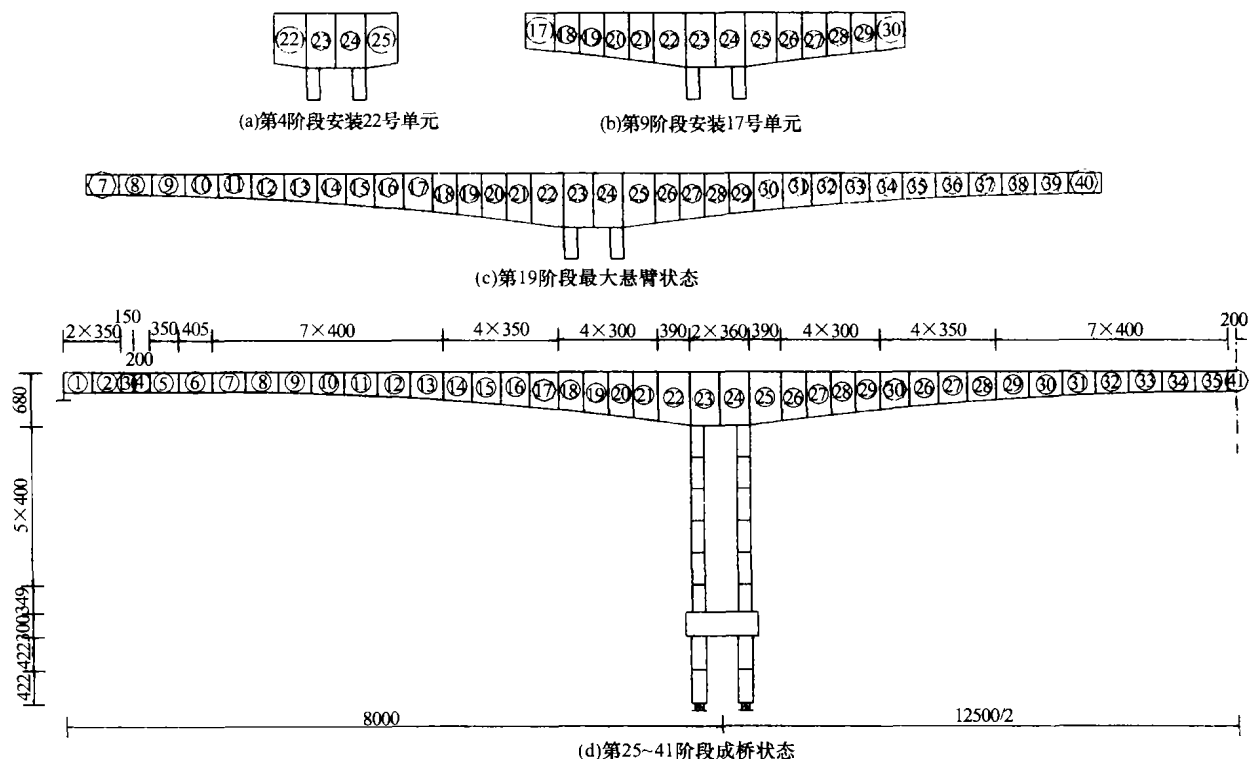


图 1 计算阶段及单元离散示意图

本文分别按照 1985 年交通部发布《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》JTJ 023-85 (以下简称 JTJ 023) 荷载组合 I (恒载+汽车-超 20 级+人群荷载 6kN/m) 和 2004 年 10 月交通部发布《公路桥涵设计通用规范》JTG D60-2004 (以下简称 JTG D60) 正常使用极限状态短期效应组合 (恒载+汽车公路 I 级+人群荷载 6kN/m) 进行验算。两种方案汽车均按 3 车道设计, 横向分配系数取 $3 \times 0.8 \times 1.2 = 2.88$ 。按 JTJ 023 计算时无其它系数。按 JTG D60 计算时, 汽车荷载 (不计冲击力) 频遇值系数为 0.7 , 人群荷载频遇值系数为 1.0 。计算过程共分为 41 个阶

段, 其中 3~24 阶段模拟挂篮移动 (安装拆除) 和混凝土悬臂浇注施工过程。25 阶段作用全桥满布垂直分布荷载 44.7kN/m , 模拟桥面系和护栏重量。26~40 阶段 200d 一个阶段分析桥梁建成后 10a 内恒载不变情况下混凝土收缩徐变的影响。41 阶段为使用阶段荷载组合分析。按 JTG D62 规定算法计算混凝土收缩徐变时, 上部结构构件理论厚度取跨中 40cm 与支点 54cm 的平均值 47cm , 下部结构构件理论厚度取薄壁墩计算值 130cm , 环境相对湿度 55% , 混凝土加载龄期 3d 。按 JTG D62 F.1 和 F.2 有关公式计算出收缩系数 $0.000\,529\,8$, 上部结构徐变系数 3.119 , 下部结

构徐变系数 2.788。按 JTJ 023 计算时,混凝土收缩徐变系数与 JTG D62 取相同数值,时间函数按 JTJ 023 附录四算法。主要控制阶段截面腹板主拉应力计算相

关几何参数及应力计算结果列于表 1。按 JTJ 023 与 JTG D62 不同剪应力算法计算的成桥阶段最小(绝对值最大)主拉应力结果分布曲线见图 2。

表 1 JTG D62 主拉应力计算结果对比

阶 段	截 面	A /m ²	A ₀ /m ²	I ₀ /m ⁴	y _c /m	y /m	σ _{cx} /MPa	σ _{cy} /MPa	S _d /m ³		τ/MPa			σ _q /MPa					σ _q /MPa				
									a	b	a	b	c	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
4	22j	17.10	16.63	116.11	3.37	6.00	0.54	0.66	18.16	16.65	-0.67	-0.62	-0.71	-0.46	-0.40	-0.49	-0.43	-0.05	1.00	0.95	1.03	0.98	1.26
						3.46	0.41	0.66	21.95	20.44	-0.82	-0.76	-0.84	-0.64	-0.58	-0.66	-0.60	-0.26	1.05	0.99	1.07	1.01	1.33
						1.05	0.28	0.66	18.98	17.48	-0.71	-0.65	-0.69	-0.58	-0.52	-0.56	-0.50	-0.18	0.86	0.81	0.84	0.78	1.13
9	17i	12.94	12.60	37.66	2.43	3.63	1.56	0.65	10.02	9.41	-0.74	-0.70	-0.70	-0.30	-0.27	-0.27	-0.24	0.31	1.86	1.83	1.83	1.80	1.90
						2.48	0.95	0.65	10.81	10.20	-0.80	-0.76	-0.77	-0.46	-0.42	-0.43	-0.39	0.06	1.41	1.37	1.38	1.34	1.54
						0.79	0.06	0.64	9.33	8.72	-0.69	-0.65	-0.71	-0.66	-0.62	-0.69	-0.64	-0.38	0.72	0.68	0.74	0.70	1.09
25	22j	17.10	16.95	119.30	3.43	6.00	5.83	0.68	17.82	17.34	-1.41	-1.32	-1.59	-0.32	-0.28	-0.41	-0.36	-0.26	6.15	6.11	6.23	6.18	6.22
						3.46	3.86	0.65	21.44	20.96	-1.70	-1.61	-1.83	-0.64	-0.58	-0.73	-0.66	-0.10	4.51	4.45	4.60	4.53	4.62
						1.05	2.00	0.63	18.31	17.84	-1.47	-1.37	-1.37	-0.78	-0.70	-0.70	-0.62	-0.11	2.77	2.70	2.70	2.61	2.76
32	17i	12.94	13.37	39.95	2.53	3.63	9.96	0.64	9.43	10.15	-2.68	-2.66	-3.75	-0.68	-0.67	-1.26	-1.26	-0.68	10.63	10.62	11.21	11.21	11.28
						2.48	9.78	0.64	10.10	10.81	-2.89	-2.86	-3.68	-0.79	-0.78	-1.23	-1.23	-0.66	10.57	10.56	11.01	11.01	11.08
						0.79	9.52	0.63	8.42	9.14	-2.46	-2.44	-1.88	-0.60	-0.59	-0.36	-0.36	0.26	10.12	10.11	9.88	9.88	9.91
41	22j	17.10	17.72	126.75	3.57	6.00	11.35	0.65	17.03	18.91	-2.73	-2.69	-4.02	-0.62	-0.61	-1.28	-1.29	-0.70	11.98	11.96	12.63	12.64	12.70
						3.46	10.31	0.64	20.26	22.15	-3.28	-3.25	-4.14	-0.96	-0.94	-1.45	-1.46	-0.89	11.27	11.25	11.77	11.77	11.84
						1.05	9.32	0.64	16.77	18.66	-2.80	-2.76	-1.85	-0.77	-0.76	-0.35	-0.36	0.26	10.10	10.08	9.68	9.68	9.71
41	17i	12.94	13.43	40.16	2.54	3.63	9.82	0.61	9.38	10.21	-3.04	-3.05	-4.06	-0.86	-0.87	-1.46	-1.48	-0.93	10.68	10.69	11.28	11.30	11.38
						2.48	9.57	0.63	10.04	10.87	-3.26	-3.27	-4.02	-1.01	-1.01	-1.47	-1.49	-0.94	10.57	10.58	11.03	11.05	11.13
						0.79	9.19	0.62	8.34	9.17	-2.77	-2.78	-2.22	-0.77	-0.78	-0.51	-0.52	0.07	9.97	9.97	9.70	9.71	9.75
41	22j	17.10	17.79	127.39	3.58	6.00	10.32	0.64	21.69	25.05	-3.04	-3.04	-4.47	-0.83	-0.83	-1.67	-1.71	-1.15	11.15	11.15	11.99	12.03	12.11
						3.46	10.15	0.64	20.16	22.25	-3.65	-3.65	-4.59	-1.17	-1.17	-1.76	-1.81	-1.26	11.33	11.33	11.92	11.96	12.05
						1.05	10.00	0.67	16.64	18.73	-3.10	-3.10	-2.02	-0.88	-0.88	-0.39	-0.42	0.19	10.88	10.88	10.39	10.42	10.44
41	17i	12.94	13.43	40.16	2.54	3.63	9.55	0.61	9.38	10.21	-3.00	-3.01	-3.98	-0.87	-0.87	-1.44	-1.46	-0.92	10.41	10.41	10.99	11.00	11.08
						2.48	9.23	0.60	10.04	10.87	-3.23	-3.23	-3.95	-1.02	-1.02	-1.46	-1.47	-0.94	10.25	10.25	10.69	10.71	10.79
						0.79	8.78	0.60	7.84	9.17	-2.74	-2.75	-2.22	-0.79	-0.79	-0.53	-0.54	0.03	9.56	9.57	9.31	9.32	9.35
41	22j	17.10	17.79	127.39	3.58	6.00	9.89	0.62	21.69	25.05	-3.02	-3.01	-4.43	-0.85	-0.85	-1.69	-1.73	-1.19	10.74	10.74	11.59	11.63	11.71
						3.46	9.83	0.62	20.16	22.25	-3.62	-3.62	-4.55	-1.19	-1.19	-1.78	-1.82	-1.29	11.02	11.02	11.61	11.65	11.74
						1.05	9.77	0.61	16.64	18.73	-3.08	-3.07	-2.02	-0.89	-0.89	-0.40	-0.42	0.17	10.66	10.66	10.17	10.19	10.22
41	17i	12.94	13.43	40.16	2.54	3.63	9.38	0.59	9.38	10.21	-3.00	-3.00	-3.98	-0.88	-0.88	-1.46	-1.47	-0.95	10.25	10.26	10.84	10.85	10.92
						2.48	9.11	0.58	10.04	10.87	-3.22	-3.23	-3.95	-1.02	-1.03	-1.47	-1.49	-0.96	10.14	10.14	10.59	10.60	10.68
						0.79	8.73	0.59	7.84	9.17	-2.74	-2.74	-2.21	-0.79	-0.79	-0.53	-0.54	0.02	9.52	9.52	9.26	9.27	9.31
41	22j	17.10	17.79	127.39	3.58	6.00	9.67	0.61	21.69	25.05	-3.02	-3.01	-4.43	-0.86	-0.86	-1.72	-1.76	-1.23	10.53	10.53	11.39	11.43	11.51
						3.46	9.71	0.60	20.16	22.25	-3.62	-3.62	-4.55	-1.20	-1.20	-1.80	-1.84	-1.31	10.91	10.91	11.51	11.55	11.63
						1.05	9.75	0.60	16.64	18.73	-3.07	-3.07	-2.02	-0.89	-0.89	-0.40	-0.42	0.16	10.64	10.64	10.15	10.17	10.20
41	17i	12.94	13.43	40.16	2.54	3.63	8.94	0.59	9.38	10.21	-3.37	-3.38	-4.35	-1.13	-1.13	-1.77	-1.78	-1.27	9.84	9.84	10.44	10.45	10.53
						2.48	9.11	0.58	10.04	10.87	-3.62	-3.63	-4.34	-1.27	-1.27	-1.74	-1.76	-1.24	10.11	10.12	10.56	10.58	10.65
						0.79	8.50	0.59	7.84	9.17	-3.07	-3.07	-2.55	-0.99	-1.00	-0.70	-0.72	-0.17	9.30	9.30	9.04	9.04	9.08
41	22j	17.10	17.79	127.39	3.58	6.00	8.78	0.61	21.69	25.05	-3.30	-3.30	-4.71	-1.10	-1.10	-2.05	-2.09	-1.59	9.71	9.71	10.62	10.67	10.76
						3.46	9.71	0.60	20.16	22.25	-3.96	-3.96	-4.88	-1.41	-1.41	-2.03	-2.07	-1.56	10.91	10.91	11.51	11.55	11.63
						1.05	9.74	0.60	16.64	18.73	-3.35	-3.35	-2.29	-1.04	-1.04	-0.51	-0.54	0.04	10.63	10.63	10.14	10.17	10.19

注: ①表中 A 为素混凝土面积; y_c 为换算截面重心到下缘距离; y 为计算主应力点到下缘距离; 其余符号说明同 (1) ~ (7) 公式说明。
②表中 a 为剪应力简化算法; b 为剪应力钢筋换算截面修正; c 为剪应力变高度梁弯矩轴力修正; d 为剪应力全修正算法; e 为剪应力全修正并计入竖向预应力作用。
③表中 41 阶段为使用阶段, 其应力计算结果是汽车+ 人群+ 恒载的最小值。

分析表 1 和图 2 可以得出如下几点结论:

(1) GQJS 截面参数计算合理。图 1 表明 22 单元在第 4 阶段安装, 17 单元在第 9 阶段安装。单元安装阶段预应力钢筋没有压浆, 要考虑预应力钢筋孔道对截面的削弱, 因此该阶段 A₀< A。以后各阶段 A₀ 逐

渐加大, 并且最终 A₀> A 说明换算截面中考虑了预应力钢筋面积对换算截面的贡献。I₀ 的变化规律与 A₀ 相近。由图 2 知两个截面预应力钢筋主要分布在顶板, 随着钢筋逐步参与截面参数换算, 截面重心在逐步上移, 即值在逐步加大。考虑钢筋换算截面修正

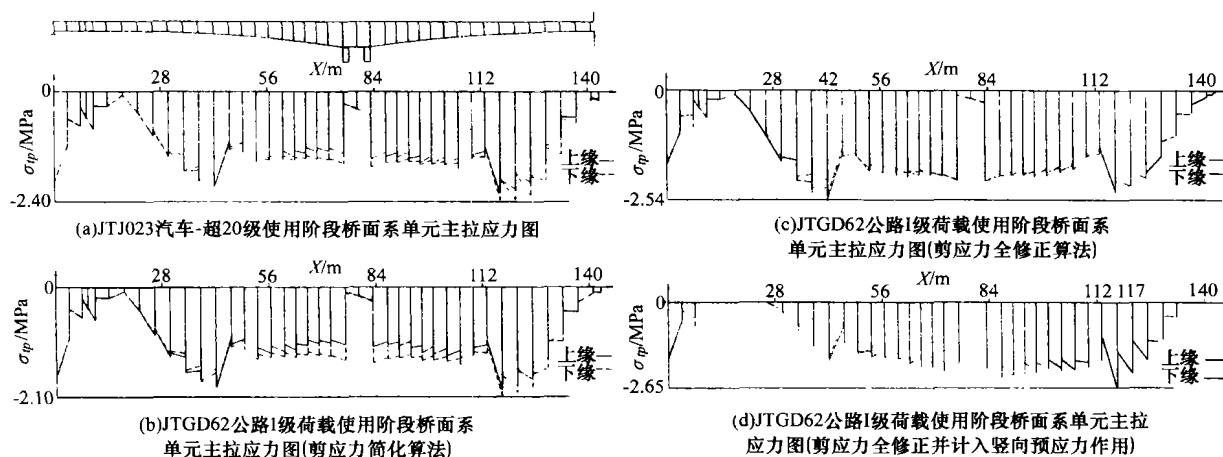


图 2 使用阶段桥面系单元主拉应力图

时 S_0 与 A_0 和 I_0 的变化规律相近, 不考虑钢筋换算截面修正时 S_0 值逐阶段减少是由换算截面重心在逐阶段上移引起。

(2) 各种剪应力的算法对主拉应力的计算有一定影响。剪应力简化算法与考虑钢筋换算截面对 S_0 的修正引起 S_0 的相对误差均值为 9.1%, 引起剪应力的相对误差均值为 1.7%, 引起主拉应力的相对误差均值为 2.7%, 引起主压应力的相对误差均值为 0.8%。剪应力简化算法与考虑变高度梁弯矩轴力修正引起剪应力的相对误差均值为 24.6%, 引起主拉应力的相对误差均值为 27.0%, 引起主压应力的相对误差均值为 4.4%。剪应力简化算法与剪应力全修正算法引起主拉应力的相对误差均值为 48.1%, 引起主压应力的相对误差均值为 4.8%。剪应力简化算法与剪应力全修正算法并计入竖向预应力作用引起主拉应力的相对误差均值为 56.4%, 引起主压应力的相对误差均值为 8.1%。由此可见考虑变高度梁弯矩轴力修正对剪应力、主拉应力影响较大。竖向预应力作用对主拉应力影响也比较大。钢筋换算截面对剪应力、主拉应力有一定影响, 但相对较小。

(3) 竖向预应力锚具变形及钢筋回缩产生的预应力损失对短钢筋影响较大。17i 截面竖向预应力钢筋明显比 22j 截面钢筋短, 因此 17i 截面靠近顶板 ($y = 3.63$) 处初始竖向应力 (0.652MPa) 明显小于 22j 截面靠近顶板 ($y = 6.00$) 处初始竖向应力 (0.665MPa)。同一截面上钢筋孔道偏差产生的预应力摩阻损失使靠近底板处应力小于靠近顶板应力, 且钢筋越长差值越大, 例如: 9 阶段 22j 截面靠近底板处应力为 0.653MPa, 靠近顶板应力 0.658MPa, 差值 0.005MPa, 相对误差 0.8%; 9 阶段 17i 截面靠近底板处应力为 0.649MPa, 靠近顶板应力 0.652MPa, 差

值 0.003MPa, 相对误差 0.5%。混凝土收缩徐变引起的预应力损失使竖向应力逐阶段减小, 其中 22j 截面靠近顶板处竖向应力从 0.665MPa 减小至 0.612MPa, 减小幅度 0.053MPa, 17i 截面靠近顶板处竖向应力从 0.652MPa 减小至 0.599MPa, 减小幅度 0.053MPa。计入竖向预应力作用可以明显减小主拉应力, 使用阶段 22j 截面靠近顶板处主拉应力从 2.09MPa 减小至 1.59MPa, 减小幅度 0.50MPa; 17i 截面靠近顶板处主拉应力从 1.78MPa 减小至 1.27MPa, 减小幅度 0.51MPa。

(4) 根据 JTG D62 6.3.1 规定: 现场浇注全预应力混凝土构件, 在作用短期效应组合下应满足 $\sigma_p \leq 0.4f_p$, 查 JTG D62 表 3.1.3 C50 混凝土抗拉强度标准值 $f_p = 2.65\text{MPa}$, 即应满足 $\sigma_p \leq 1.06\text{MPa}$ 。表 1 和图 2 可以看出, 该桥使用阶段的主拉应力值超限, 说明其斜截面抗裂性能没有达到新规范的要求。而根据 JTJ 023-85 第 5.2.24 条规定: 在使用荷载组合 I 作用下, 预应力混凝土主拉应力应符合 $\sigma_{tl} \leq 0.8R_{bt}$, 查 JTJ 023-85 表 2.1.2, 50 号混凝土标准强度 $R_b = 3\text{MPa}$, 即应满足 $\sigma_{tl} \leq 2.4\text{MPa}$ 。由图 2 可以看出预应力混凝土主拉应力满足 JTJ 023-85 规范要求。计算结果对比分析表明, 新规范在斜截面抗裂性能验算方面提高了要求。近年来, 不少公路大跨径连续梁和连续刚构桥发生斜裂缝, 影响了桥梁的安全使用, 新规范的出台有利于从设计源头采取措施, 提高桥梁的抗裂性能, 减少裂缝的发生。

3 结语

本文介绍了 GQJS 按照 JTG D62 规范改版中涉及到的箱梁主拉应力计算要点, 以一座已建成的预应力混凝土连续刚构桥设计计算为例, 用(下转第 59 页)

表 4 列出了 5 座斜拉桥矮塔斜拉桥特征参数及相应的斜拉索荷载效应影响度。可以看出，矮塔斜拉桥特征参数与斜拉索荷载效应影响度的相关性与上述分析基本相符，说明上述结论具有普遍意义。当 α 减小到一定程度后，矮塔斜拉桥斜拉索的作用与普通斜拉桥相比发生了本质的变化。当斜拉桥的 $\alpha \leq 40 \sim 50$ 可以界定为矮塔斜拉桥。

表 4 3 座斜拉桥的特征参数对比

桥名	α	$\delta_l / \%$	$\delta M^l / \%$	$\delta M^b / \%$	$\delta T / \%$	备注
小西湖桥(双塔)	36.4	14.9	15.0	19.7	18.3	属矮塔范围
银湖桥(独塔)	26.9	9.6	9.7	13.1	7.6	属矮塔范围
战备桥(双塔)	38.5	15.8	15.9	20.8	19.4	属矮塔范围
银滩桥(独塔)	157.4	9.7	88.8	93.5	65.1	属普通斜拉桥
成都桥(独塔)	151.4	67.8	68.5	71.3	53.3	属普通斜拉桥

3 结论

- (1) 矮塔斜拉桥特征参数 α 可以定量反映矮塔斜拉桥的综合结构特性，用 α 比单纯用塔高、索的截面积或主梁的抗弯刚度描述矮塔斜拉桥的结构特性更全面且更合理。
- (2) 可用 α 和 δ 定量界定矮塔斜拉桥；当斜拉桥的 $\alpha \leq 40 \sim 50$ ， δ 、 δM^l 、 δM^b 、 δT 一般不超过

25%，此时可以认为是矮塔斜拉桥。

(3) 随矮塔斜拉桥特征参数 α 的减小，斜拉索直接承受竖向荷载的作用逐渐减小，当 $\alpha < 10$ 时，其直接承受荷载的作用微乎其微 ($\delta < 5\%$)。此时，斜拉索更像是主梁的体外预应力筋。

根据笔者对另一独塔两跨矮塔斜拉桥的研究，与以上结论基本一致^[8]。

参考文献:

[1] Michel Virlogeux. Recent Evolution of Cable-stayed Bridges [J]. Engineering Structures, 1999, 21: 737- 755.

[2] 陈亨锦, 王凯, 李承根. 浅谈部分斜拉桥 [J]. 桥梁建设, 2002, 141 (1): 44- 47.

[3] 严国敏. 再论部分斜拉桥, 兼论多塔斜拉桥 [C]. 上海: 第十三届全国桥梁学术会议论文集, 1998: 178- 182.

[4] Hassan I A Hegab. Parametric Investigation of Cable-Stayed Bridge [J]. Journal of Structure Eng. ASCE 1988, 114 (8): 1917- 1928.

[5] 陈德伟, 范立础, 张权. 独塔斜拉桥的总体布置和参数研究 [J]. 土木工程学报, 1999, 3: 34- 40.

[6] 杨琪, 李乔, 编译. 斜拉桥的静力行为影响参数及其静力分析 [J]. 国外桥梁, 1999, 4: 31- 41.

[7] 蔺鹏臻. 矮塔斜拉桥结构优化 [D]. 甘肃兰州: 兰州交通大学, 2003.

[8] 刘凤奎, 蔺鹏臻, 陈权, 刘世忠. 矮塔斜拉桥特征参数研究 [J]. 工程力学, 2004, 21 (2): 199- 203

(上接第 55 页)

GQJS 对主应力计算中涉及到的各项影响因素进行对比分析，揭示了各主应力计算方法及对计算结果的影响规律，为桥梁设计人员提供参考，以便在设计中采取措施避免箱梁开裂。

结果分析表明，考虑变高度梁弯矩轴力修正对剪应力、主拉应力影响较大，竖向预应力作用对主拉应力影响也比较大。钢筋换算截面对剪应力、主拉应力有一定影响，但相对较小。新规范在斜截面抗裂性能验算方面提高了要求，有利于提高桥梁的抗裂性能，

减少裂缝的发生。

参考文献:

[1] JTG D60-2004, 公路桥涵设计通用规范 [S].

[2] JTG D62-2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S].

[3] 范立础, 徐光辉. 桥梁工程 [M]. 人民交通出版社, 2004.

[4] 徐光辉, 胡明义. 公路桥涵设计手册梁桥 (上册) [M]. 人民交通出版社, 1996.

[5] 范家聪. 预应力变截面梁的剪应力计算 [M]. 公路, 1983.