

钢绞线预应力筋用齿合型单孔开口锚具的计算分析

潘立 刘明保

(中国建筑科学研究院建筑结构研究所 北京 100013)

摘要:在钢绞线预应力筋用齿合型单孔开口锚具(QMK15-1锚具)的设计与试验研究中,为满足GB/T 14370-2000国家标准和JGJ85-2002行业标准的各项技术要求,进行了解析计算与有限元分析。在此基础上通过设计优化,进一步提高了产品的可靠性与适用性,降低了加工成本。本文详细论述了相关计算分析的方法与结果,可为研制同类产品提供参考。

关键词:钢绞线预应力筋 齿合型单孔开口锚具 解析计算 有限元分析

1 产品简介

钢绞线预应力筋用齿合型单孔开口锚具(QMK15-1锚具)组装后呈圆柱体,外径58mm,高度46mm,锥孔偏心距6.8mm,锥孔角度 13.5° ,使用的钢制夹片同普通单孔锚具,全重0.82kg,锚固力测孔直径14mm,配合使用开口型张拉千斤顶。产品与各部件外观见图1。

QMK15-1锚具的设计用途如下:在楼盖开洞改造工程中用于锚固洞口处外露的无粘结预应力断筋,“先锚后断”不降低楼盖施工期间的抗裂度与刚度。在超长混凝土连续楼盖中,在后浇带部位用于锚固分段张拉的无粘结预应力长筋,以降低其预应力张拉摩擦损失,为长筋提供中间锚固点,避免其因搭接连接使相邻段预应力效应相互抵消损失,及锚具部位混凝土出现高拉应力区或张拉裂缝。

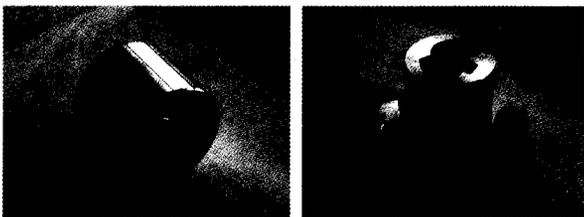


图1 QMK15-1锚具及各部件外观

委托国家建筑工程质量监督检验中心进行了QMK15-1锚具组装件静载拉力破坏试验、周期循环荷载试验与疲劳荷载试验,结果^[4]满足GB/T 14370-2000国家标准^[1]和JGJ85-2002行业标准^[2]

的各项技术要求。该产品目前已经批量生产,并在多项实际工程中得到应用。

2 解析计算

QMK15-1锚具锚紧钢绞线后,锚环纵向受压、环向受拉,两者的合力与被锚固钢绞线的拉力 F_t 相平衡。夹片与锚环的接触面上存在摩擦力,并随两者之间的挤压力和摩擦系数增大而增加。在 F_t 和锥孔角度不变情况下,随着夹片与锚环接触面上摩擦力的增大,锚环的环向应力与纵向应力的比值有所减小。

设夹片作用于锚环的径向均布挤压应力为 q_r ,且 F_t 值不变,在弹性范围内,随摩擦系数增大, q_r 值略有减小,通常用摩擦角 β 对 q_r 进行减小调整,见图5,以降低锚环的环向拉应力及变形计算值, $\beta < 12^\circ$ 且可取为常数^[3]。为获得偏于安全的结果,计算中暂不考虑 β 的影响。开口锚环验算截面A-A、B-B、C-C的位置见图2。

2.1 锚环A-A截面拉应力验算

锚环纵向A-A截面位置见图2。取锚环锥孔内侧一小段弧长 ds 进行分析, r_{\max} 为大孔端面锥孔的半径, r_{\min} 为小孔端面锥孔的半径, ds 对应锥孔圆心的角度为 $d\theta$,夹片作用于锚环的径向均布挤压应力为 q_r ,单位高度弧长 ds 上作用的径向力等于 $q_r \cdot ds = q_r \cdot r_{\max} \cdot d\theta$, q_r 垂直于锚环A-A截面的分量为 $q_r \cdot r_{\max} \cdot \sin\theta \cdot d\theta$,由式(1)可解出锚环大孔端面单位高度上的环向拉力 $F_{c,u}$ 。

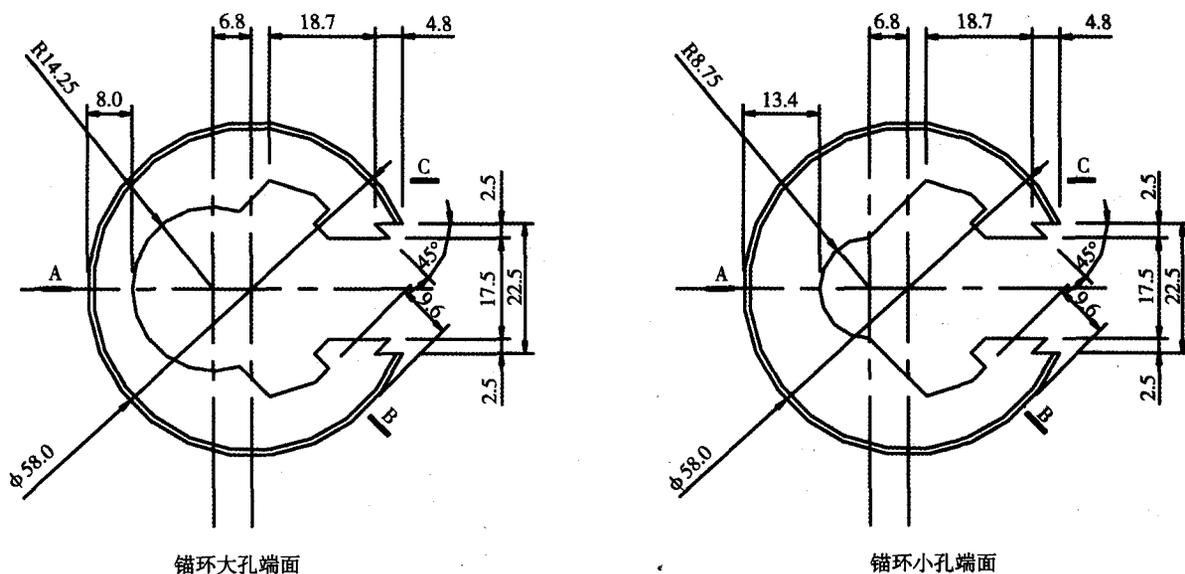


图2 开口锚环验算截面位置示意图

$$F_{c,u} = \int_0^{\pi/2} q_r \cdot r_{\max} \cdot \sin\theta \cdot d\theta = q_r \cdot r_{\max} \quad (1)$$

同理, 由式(2)可解出锚环小孔端面单位高度上的环向拉力 $F_{c,l}$,

$$F_{c,l} = \int_0^{\pi/2} q_r \cdot r_{\min} \cdot \sin\theta \cdot d\theta = q_r \cdot r_{\min} \quad (2)$$

对锚环两侧端面之间任意点单位高度上的环向拉力, 可在 $F_{c,u}$ 与 $F_{c,l}$ 之间线性插值确定。设夹片与锥孔挤压面的高度为 h_c , 且同锚环高度。图2中A-A截面的面积为 $A_{c,A-A}$, 该截面平均环向拉应力为 $\sigma_{c,A-A}$,

$$\sigma_{c,A-A} = \frac{F_{c,u} + F_{c,l}}{2 \cdot A_{c,A-A}} \cdot h_c = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{2 \cdot A_{c,A-A}} \cdot h_c \cdot q_r \quad (3)$$

锚环锥孔内壁的面积为 A_{cone} ,

$$A_{\text{cone}} = \pi \cdot (r_{\max} + r_{\min}) \cdot H \quad (4)$$

式(4)中 H 为锚环锥孔斜边的长度, $H = \sqrt{h_c^2 + (r_{\max} - r_{\min})^2}$, 夹片挤压锚环锥孔内壁的垂直分力为 F ,

$$\begin{aligned} F &= q_r \cdot \text{tg} \frac{\varphi}{2} \cdot A_{\text{cone}} \\ &= q_r \cdot \pi \cdot H \cdot (r_{\max} + r_{\min}) \cdot \text{tg} \frac{\varphi}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中 φ 为锚环锥孔的角度。设被锚固预应力筋的截面积与钢材标准抗拉强度分别为 A_p 、 f_{ptk} , 根据平衡关系有 $F = A_p \cdot f_{ptk}$, 代入式(5)后可解出夹片作用于锚环单位高度上的径向挤压应

$$q_r = \frac{A_p \cdot f_{ptk}}{\pi \cdot H \cdot (r_{\max} + r_{\min}) \cdot \text{tg} \frac{\varphi}{2}} \quad (6)$$

已知 $h_c = 46\text{mm}$, $A_p = 46\text{mm}^2$, $f_{ptk} = 1860\text{MPa}$, $H = 46.33\text{mm}$, $r_{\max} = 14.25\text{mm}$, $r_{\min} = 8.75\text{mm}$, $\varphi = 13.64^\circ$, 由式(6)可解出 $q_r = 650.4\text{MPa}$ 。

已知 $A_{c,A-A} = 0.5 \times (13.5 + 8.0) \times 46 = 494.5\text{mm}^2$, 将 q_r 和 $A_{c,A-A}$ 代入式(3)后, 可解出 $\sigma_{c,A-A} = 695.8\text{MPa}$ 。开口锚环钢材为40CrA, 屈服强度设计值 $f_y = 785\text{MPa}$ 。因有 $\sigma_{c,A-A} < f_y$, 或 $\frac{\sigma_{c,A-A}}{f_y} = 0.89 < 1.0$, 锚环A-A截面环向受拉承载力满足设计要求。

2.2 锚环B-B截面拉应力验算

设锚环内环向拉力为 F_c ,

$$F_c = \sigma_{c,A-A} \cdot A_{c,A-A} \quad (7)$$

锚环纵向B-B截面的面积为 $A_{c,B-B}$, 根据图2可解出 $A_{c,B-B} = 9.6 \times 46 = 441.6\text{mm}^2$, 该截面上的平均极限拉应力为 $\sigma_{c,B-B}$,

$$\sigma_{c,B-B} = \frac{F_c}{A_{c,B-B}} = \frac{A_{c,A-A}}{A_{c,B-B}} \cdot \sigma_{c,A-A} \quad (8)$$

将 $A_{c,A-A} = 494.5\text{mm}^2$, $\sigma_{c,A-A} = 695.8\text{MPa}$ 代入式(8), 可解出 $\sigma_{c,B-B} = 779.3\text{MPa}$ 。因有 $\sigma_{c,B-B} < f_y$, 或 $\frac{\sigma_{c,B-B}}{f_y} = 0.99 < 1.0$, 锚环B-B截面环向的受拉承载力满足设计要求。

2.3 锚环C-C截面剪应力验算

锚环C-C截面的面积 $A_{c,C-C}=18.9 \times 46=869.4\text{mm}^2$, 见图2, 封口楔块两端面大、小圆弧对应的角度分别为 141.5° 、 180° , 相应半个弧段单位高度上的径向力分别为 $F_{r,\max}$ 、 $F_{r,\min}$,

$$F_{c,\max} = 14.25 \cdot q_r \int_0^{70.75^\circ} \sin\theta \cdot d\theta$$

$$= 14.25 \times 650.4 \times (0.944 - 0) = 8750\text{N} \quad (9)$$

$$F_{c,\min} = 8.75 \cdot q_r \int_0^{90^\circ} \sin\theta \cdot d\theta$$

$$= 8.75 \times 650.4 \times (1.0 - 0) = 5691\text{N} \quad (10)$$

作用在C-C截面上的剪应力 $\tau_{c,c}$ 可由下式求出,

$$\tau_{c-c} = \frac{F_{v,\max} + F_{v,\min}}{2 \cdot A_{c,c-c}} \cdot h_c$$

$$= \frac{8750 + 5691}{2 \times 869.4} \times 46 = 382.0\text{MPa} \quad (11)$$

根据材料力学结果, 锚环C-C截面的最大剪应力设计值 τ_d 可由式(12)求出,

$$\tau_d = 0.6 \cdot f_y = 0.6 \times 785 = 471\text{MPa} \quad (12)$$

因有 $\tau_{c,c} < \tau_d$, 或 $\frac{\tau_{c,c}}{\tau_d} = 0.81 < 1.0$, 锚环C-C截面的抗剪承载力满足设计要求。

2.4 封口楔块D-D截面拉应力验算

封口楔块D-D截面的位置见图3。

D-D剖面的截面积 $A_{b,D-D} = 0.5 \times (12.5 + 6.9) \times 46 = 446.2\text{mm}^2$, 该截面作用环向拉应力为 $\sigma_{b,D-D}$,

有

$$\sigma_{b,D-D} = \frac{F_c}{A_{b,D-D}} = \frac{\sigma_{c,A-A} \cdot A_{c,A-A}}{A_{b,D-D}} \quad (13)$$

将 $\sigma_{c,A-A} = 695.8\text{MPa}$, $A_{c,A-A} = 494.5\text{mm}^2$, 与 $A_{b,D-D}$ 代入式(13)后, 可解出 $\sigma_{b,D-D} = 771.1\text{MPa}$,

$\sigma_{c,D-D} < f_y$, 或 $\frac{\sigma_{c,D-D}}{f_y} = 0.98 < 1.0$, 楔块D-D截面环向受拉承载力满足设计要求。

3 有限元弹塑性分析

使用有限元通用计算分析程序ANSYS, 按QMK15-1锚具的实际受力工况, 对其极限状态下的应力与变形进行了弹塑性计算分析。

3.1 计算条件

计算单元: 开口锚环与齿状楔块使用Solid95单元(3维体单元, 每节点X、Y、Z方向有3个自由度), 总数101071, 以适应不规则形状、曲线边界和计算精度的要求。锚环锥孔内壁使用Surf154单元, 总数747, 以适应在三维结构单元表面施加挤压面力的需要。锚环开口外端凹槽部位使用Targe170单元, 总数6844, 以描述计算对象的目标面。封口楔块凸齿部位使用Conta174单元, 总数7153, 以描述计算对象的接触面。使用Targe170与Conta174单元, 可准确模拟锚环开口外端凹槽与封口楔块凸齿接触咬合的状态。计算模型的单元总数115815, 节点总数335289。

材料特性: 40CrA高强合金钢, 屈服强度

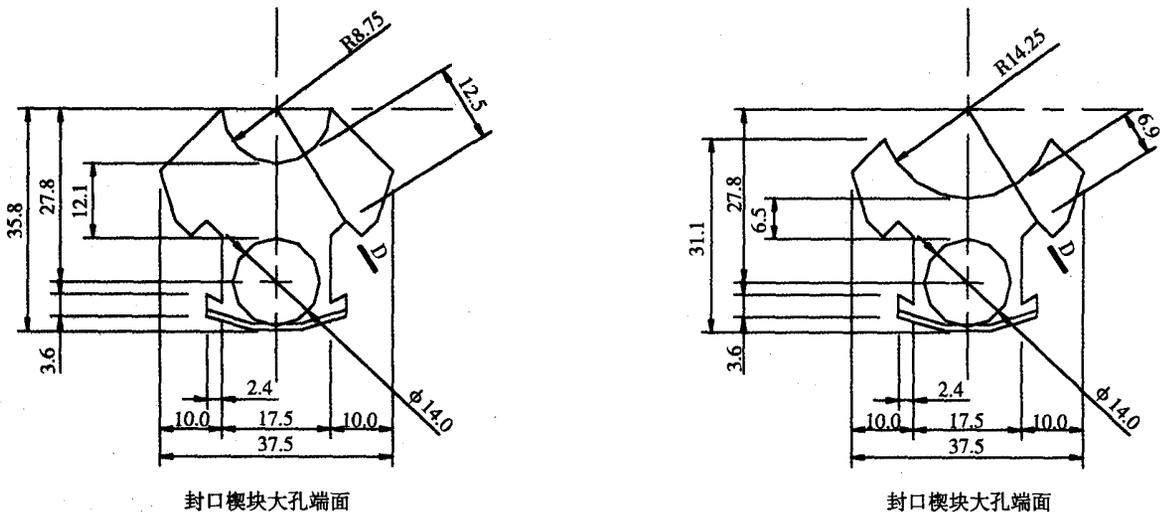


图3 齿形封口楔块验算截面位置示意图

785MPa, 服从Mises屈服准则, 初始弹性模量 2.0×10^5 MPa, 泊松比0.3, 静摩擦系数0.10, 屈服后切线模量6000MPa, 计算取简化后的 $\sigma_s - \varepsilon_s$ 曲线为双折线, 见图4。

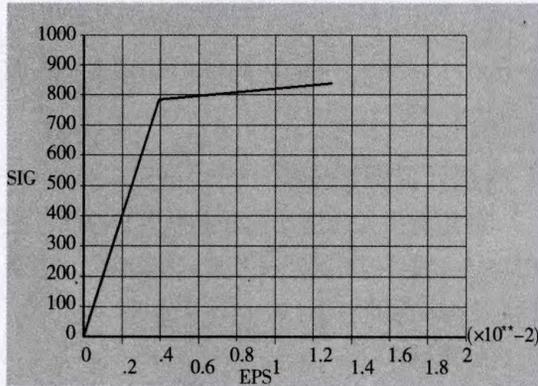


图4 40Cr钢材的 $\sigma_s - \varepsilon_s$ 简化计算曲线

计算简图: QMK15-1锚具的计算简图见图5, α 为坐标轴X与X1、Y与Y1之间的夹角, 且等于夹片外周锥面的角度, 为夹片与锚环之间的摩擦角, 被锚固钢绞线的极限拉力 $F = A_p \cdot f_{ptk}$ 。

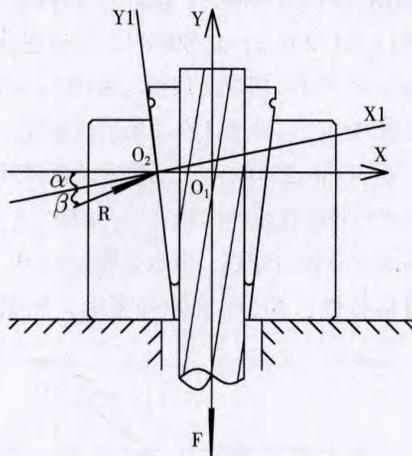


图5 QMK15-1锚具计算简图

计算参数: 锚环端面大、小孔的半径分别为 r_{\max} 、 r_{\min} , 夹片挤压面的Y向高度为 h_c , 锚环锥孔内壁的斜边长度及与夹片接触挤压面积分别为 H 、 A 。设夹片外周分布压应力的合力为 R , 在Y方向有 $R \cdot \sin(\alpha + \beta) = F$, R 的X方向水平分力 $R_h = R \cdot \cos(\alpha + \beta)$ 。计算取: $\alpha = 13.46/2 = 6.82^\circ$, $\beta = 5.7^\circ$ [3], $r_{\max} = 14.25$ mm, $r_{\min} = 8.75$ mm, $A_p = 140$ mm², $f_{ptk} = 1860$ MPa, $F = A_p \cdot f_{ptk} = 140 \times 1860 = 260.4$ kN, $h_c = 46 - 9 = 37$ mm,

$$H = \sqrt{h_c^2 + (r_{\max} - r_{\min})^2} = \sqrt{37^2 + (14.25 - 8.75)^2} = 37.41 \text{ mm},$$

$$A = \pi \cdot H \cdot (r_{\max} + r_{\min}) = 37.41 \cdot \pi \cdot (14.25 + 8.75) = 2703 \text{ mm}^2.$$

在图5所示坐标系中, F 在锚环锥孔内壁X、Y方向作用的均匀挤压应力分别为:

$$q_x = \frac{A_p \cdot f_{ptk}}{A \cdot \tan(\alpha + \beta)} = \frac{140 \times 1860}{2703 \times \tan(6.82 + 5.7)} = 433.8 \text{ MPa} \quad (14)$$

$$q_y = -\frac{A_p \cdot f_{ptk}}{A} = -\frac{140 \times 1860}{2703} = -96.3 \text{ MPa} \quad (15)$$

3.2 分析模型

有限元计算模型的坐标原点位于锚环小孔端面上小孔的圆心, 原点沿小孔端面指向封口楔块上测孔的圆心为X轴, 原点沿小孔端面指向锚环锥孔内壁、且正交于X方向为Y轴, 原点指向锚环大孔端面的大孔圆心为Z轴(平行于锚环高度方向)。沿QMK15-1锚具的对称轴, 取其一半建立计算模型, 使用ANSYS提供的专用工具自动划分计算单元, 见图6。

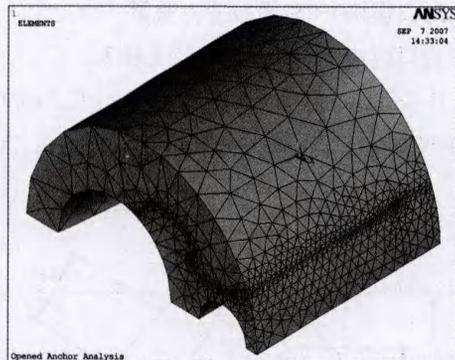


图6 开口锚环的计算模型与单元划分图

边界约束条件: 对称轴剖面上各节点的Y方向(垂直于剖面方向)位移有约束, 锚环小孔端面各节点的X、Y、Z方向位移有约束。

3.3 计算结果与分析

计算表明, 开口锚环模型节点的最大位移与最大应力均发生在大孔端面, 该端面部分单元节点的编号见图7。在 $F = 260.4$ kN作用下, 锚环大孔端面部分单元节点的计算位移见表1。

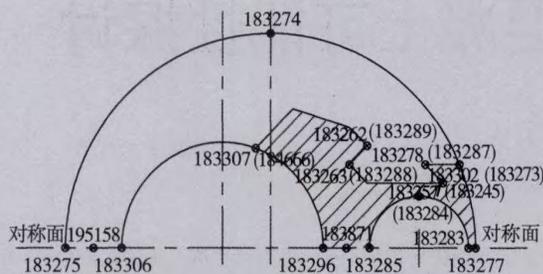


图7 开口锚环大孔端面部分单元节点编号简图

表1 开口锚环大孔端面部分节点的计算位移 (mm)

节点号	变量	位移
183262	u_x	0.208
	u_y	0.139
183273	u_x	0.000
	u_y	0.000
183274	u_x	-0.054
	u_y	0.113
183275	u_x	-0.188
	u_y	-0.000
183277	u_x	0.517
	u_y	0.402
183283	u_x	0.517
	u_y	0.344
183284	u_x	0.386
	u_y	0.169
183285	u_x	0.423
	u_y	0.000
183289	u_x	0.271
	u_y	0.107
183302	u_x	0.255
	u_y	0.442
183307	u_x	-0.114
	u_y	0.154
184666	u_x	-0.116
	u_y	0.170

注:表中 u_x 、 u_y 分别为节点X、Y方向的计算位移变量。

由表1可知,开口锚环模型183277和183283节点的X方向位移最大,均为0.517mm。锚环径向最大变形位于对称轴且与其平行,为0.517(183277节点)+0.188(183275节点)=0.705mm。楔块测孔边沿183284节点的Y方向位移最大,为0.169mm,测孔径向最大变形为 $0.169 \times 2 = 0.338$ mm。

在 $F=260.4$ kN作用下,开口锚环模型的计算变形见图8,节点等效应变分布见图9,Y方向计算应力分布见图10,等效应力分布见图11。

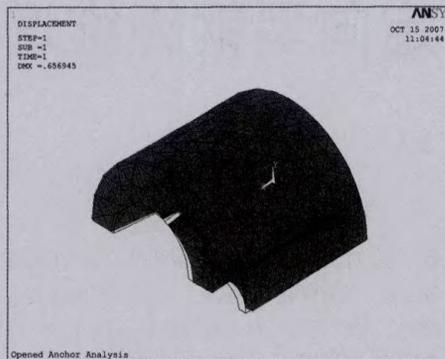


图8 开口锚环大孔端面的计算变形



图9 开口锚环节点的等效应变分布图

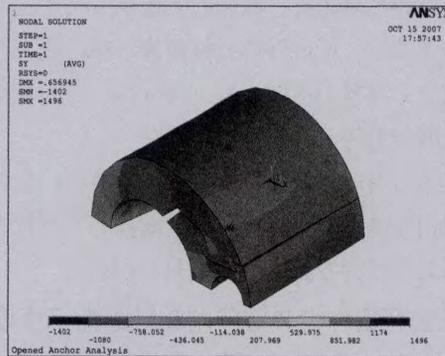


图10 开口锚环的Y方向计算应力分布图

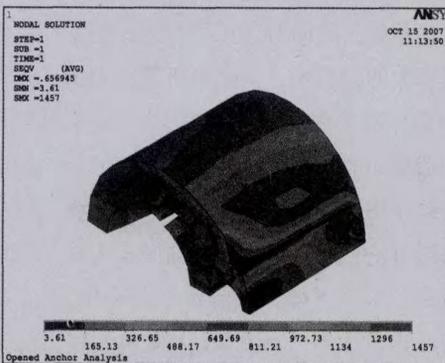


图11 开口锚环的等效计算应力分布图

(下转第16页)

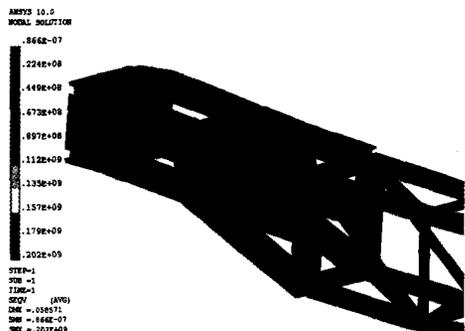


图9 桁架式横向扁担梁的Von Mises应力云图

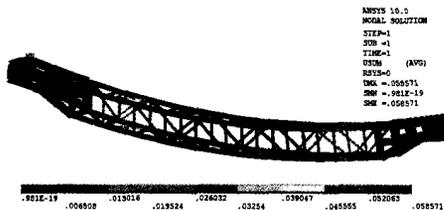


图10 桁架式横向扁担梁的挠度图

3 两种结构比较与结论

对于桁架和箱型截面的横向扁担梁，在强度、刚度和稳定性都满足设计要求的情况下，它们都有各自的优缺点。从力学性能来比较，箱型截面梁的抗弯刚度要比桁架梁差，所以箱型截面梁需要增大截面面积来提高它的抗弯刚度，这样就会使重量增加，箱型截面梁重28t，桁架梁重16t，后者比前者轻了12t，可见在满足相同刚度的情况下，桁架梁要比箱型截面梁节省材料。另外，从制造的工艺来比较，箱型截面梁的优点是结构简单，加工方便，制造周期短，桁架梁的结构复杂，需要配节点板来保证杆件间节点的强度和传力，空间焊接组装，加工周期长。

参考文献

- [1] 刘鸿文. 材料力学[M]. 高等教育出版社, 1992
- [2] GB 50017-2003 钢结构设计规范[S].
- [3] GB/T3811-2008 起重机设计规范[S].

(上接第7页)

由表2可知，183285节点处Y方向的最大应力为870MPa，183289节点处的最大等效应力为997MPa，均大于材料屈服强度785MPa，表明 $F=260.4\text{kN}$ 在作用下，锚环局部应力集中部位已进入塑性状态。ANSYS计算分析结果还表明，在极限状态下，锚环的设计控制截面（部位）的等效计算应力均小于785MPa，整体上仍处于弹性工作状态。因此可认为，QMK15-1锚具的上述构造基本满足设计要求，预测其组装件能通过各项力学性能试验。计算模型各节点的等效应力 σ_e 按式（16）确定：

$$\sigma_e = \sqrt{0.5 \cdot [(\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_y + \sigma_z)^2 + (\sigma_z + \sigma_x)^2]} \quad (16)$$

式中 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 分别为X、Y、Z方向同一节点的计算应力。

4 结论

(1) 根据开口锚环较小截面最大应力验算结果，可初步确定产品外形与控制截面尺寸，及预测出有限元分析结果。(2) 通过有限元弹塑性分析，可确定产品使用极限状态下的性能，及预测出锚具组装件试验结果。(3) 依次根据控制截面应力验算与有限元分析结果，经设计优化后可最终确定产品构造，并能最大限度避免锚具组装件试验失败。

表2 开口锚环大孔端面部分节点的计算应力 (MPa)

节点号	变量	应力
183245	σ_y	-188
	σ_e	516
183257	σ_y	516
	σ_e	978
183262	σ_y	558
	σ_e	978
183275	σ_y	792
	σ_e	826
183285	σ_y	870
	σ_e	813
183289	σ_y	-703
	σ_e	997
183296	σ_y	9
	σ_e	477
183306	σ_y	640
	σ_e	877
183307	σ_y	-321
	σ_e	408
183871	σ_y	596
	σ_e	573
184666	σ_y	-427
	σ_e	754
185158	σ_y	0
	σ_e	43

注：表中 σ_y 为节点Y方向计算应力， σ_e 为节点等效应力，正值为拉应力，负值为压应力。

参考文献

- [1] 《预应力筋用锚具、夹具和连接器》. GB/T 14370-2000
- [2] 《预应力筋用锚具、夹具和连接器应用技术规程》. JGJ 85-2002/J 219-2002
- [3] 庄茁等. 预应力结构锚固-接触力学与工程应用. 科学出版社, 2006;
- [4] 潘立, 刘明保. 钢绞线预应力筋用齿合型单孔开口锚具的设计与试验研究[J]. 建筑结构, 2009 (2)
- [5] 潘立. 钢绞线预应力筋用齿合型单孔开口锚具的结构设计与基本性能研究. 建筑科学研究报告, No.2006-001, 中国建筑科学研究院建筑结构研究所, 2008年10月。