

4500kN 大吨位 OVM 锚锚下应力分析*

印 定 安

(上海同济大学桥梁工程系, 200092)

摘 要

OVM 锚是新一代群锚体系, 它分成 OVM 15 及 OVM 13 两种型号, 适用于锚固标准强度为 1770 MPa~1860 MPa 的 $\phi 15.2$, $\phi 15.7$, $\phi 12.7$, $\phi 12.9$ 高强钢绞线, 张拉力可从 160 kN 以上自由选择。目前国内采用的最大张拉力是 4444.9 kN。本文采用 PAFEC-FE 有限元分析通用软件对 4500 kN 的锚下应力进行了分析, 给出了锚区三维应力的数值, 分布状态及分析意见, 最后对桥规 (JTJ 023-85) 中有关局部承压强度的条件进行了讨论。

关键词: 群锚体系; 锚区三维应力; 高强钢绞线; 局部承压强度

OVM 锚是柳州市建筑机械总厂, 同济大学, 广东省公路工程处协同研制而成的新一代群锚体系。

OVM 型锚具由预应力钢材、管道、螺旋筋、锚垫板和夹片组成 (图 1)。OVM 锚分成 OVM 15 及 OVM 13 两种型号。OVM 15 适用于锚固标准强度为 1770 MPa~1860 MPa, $\phi 15.2$ 或

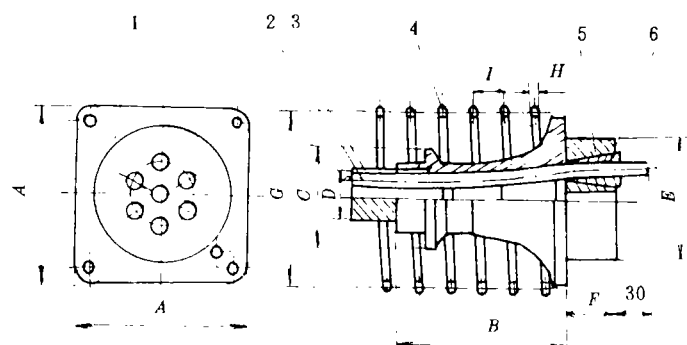


图 1 OVM 15 张拉端锚具构造

- | | | |
|--------|---------|----------|
| 1. 锚垫板 | 2. 预应力筋 | 3. 金属波纹管 |
| 4. 螺旋筋 | 5. 锚板 | 6. 夹片 |

$\phi 15.7$ 的高强钢绞线, OVM 13 适用于锚固标准强度为 1860 MPa 的 $\phi 12.7$ 或 $\phi 12.9$ 的钢绞

* 本文收到日期: 1993-04-24, 印定安, 男, 57 岁, 副教授。

线. 张拉力可从 160 kN 以上自由选择. 山东东明黄河大桥采用的锚具之一 OVM 15-27 其张拉力为 4444.9 kN, 这是迄今为止在国内桥梁上所采用的最大吨位. 本文对 OVM 锚在大吨位张拉时的受力情况作一计算分析.

1 基本资料

1.1 锚具、张拉力、材料性能:

(1) OVM 15-27 型, $A=390\text{mm}$, $B=350\text{mm}$, $C=320\text{mm}$.

(2) 张拉力 4444.9 kN.

(3) 弹性模量:

混凝土 $3.5 \times 10^4 \text{MPa}$

螺旋筋 $2.0 \times 10^5 \text{MPa}$

铸铁垫板 (下称喇叭管) $1.6 \times 10^5 \text{MPa}$

(4) 泊松比:

混凝土 0.167

螺旋筋 0.30

喇叭管 0.27

1.2 分析手段, 计算模型

计算采用 PAFEC-FE 有限元分析通用软件进行分析. 分析对象尺寸为 $150\text{ cm} \times 150\text{ cm}$ 的矩形块. 在矩形块中心锚具处作用有张拉力, 利用对称性能, 计算模型尺寸为 $75\text{ cm} \times 150\text{ cm}$, 分成 1304 个基本单元 (锚头附近最密区域单元尺寸约为 $2.0\text{ cm} \times 2.0\text{ cm}$), 其中铸铁喇叭管有二十三个单元, 螺旋筋有八个单元. 基本单元除铸铁喇叭管及其附近的混凝土采用平行四边形, 梯形单元外, 其余均为矩形单元. 由于采用旋转对称的处理方法, 所以计算结果除给出单元上八个节点的最大主应力, 最小主应力, 相应的主应力夹角, 最大剪切应力以外, 还给出了垂直于单元平面的环向应力.

2 计算情况及分析

2.1 计算结果表明, 最大的锚下应力大致发生在以锚心为圆心, 半径约为 35 cm 的区域内, 因此, 表 1 给出了 $42 \times 55\text{ cm}$ 范围内几个截面的节点最大主应力, 最小主应力和垂直单元平面的环向应力. 图 2 是根据表 1 数据所绘出的几个截面的最小主应力图.

图 3 是根据表 1 数据所绘的几个截面的最大应力图. 图 4 和图 5 分别是平行张拉力方向几个截面的最大主应力和最小主应力图.

应该指出, 图 2 和图 3 的最小主应力和最大主应力并非是 x 平面和 y 平面的正应力 (张拉力方向取 x 向, 垂直张拉力的方向定为 y 向). 最小主应力的方向从锚心向外呈发散状, 近锚头处夹角约为 85° 左右, 以后逐渐减为 55° 左右, 最后与张拉力方向平行.

2.2 锚下最小主应力 (压应力) 在锚心附近比较大, 分布也不均匀, 但距锚心 100 cm 的截面应力已比较均匀, 距锚心 125 cm 的截面, 应力已基本相等, 这是符合一般认识规律的. 主压应力的最大值发生在喇叭管前垫板后侧、螺旋箍筋以下的区域里, 其值达到 50.4 MPa, 但各单元均处于三向压力状态, 所以强度很高. 其余单元多属于单向受压状态, 主拉应力值一般只有主压应力值的十分之一, 对受力还是比较有利的.

表 1 锚下主应力汇总

应力单位 MPa

$\frac{y}{x}$	44			61.3			103.8			129.0			154.3		
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3
420	1.98	0.0	-1.88	1.14	-0.01	-1.63	-0.28	-0.69	-1.19	0.27	-1.44	-0.89	0.24	-2.10	-0.64
381	2.23	0.0	-2.31	0.10	-0.05	-1.98	-0.39	-1.45	-1.36	0.41	-2.50	-1.02	0.43	-3.32	-0.72
361	2.34	0.01	-2.58	0.09	-0.09	-2.18	-0.47	-2.06	-1.47	0.52	-3.26	-1.09	0.55	-4.16	-0.75
343	2.41	0.01	-2.90	0.08	-0.19	-2.43	-0.57	-2.89	-1.65	0.66	-4.47	-1.17	0.70	-5.20	-0.80
323	2.46	0.02	-3.26	0.07	-0.45	-2.70	0.70	-4.07	-1.73	0.86	-5.59	-1.26	0.88	-6.46	-0.86
303	2.31	0.56	-3.71	0.56	-1.13	-3.04	0.90	-5.65	-1.90	1.10	-7.38	-1.35	1.08	-7.99	-0.90
264	0.88	0.36	-4.87	0.69	-4.70	-3.88	1.49	-11.4	-2.32	1.53	-15.1	-1.86	1.97	-1.18	-1.00
244	5.95	-17.0	-4.58	2.17	-6.81	-3.87	-4.88	-46.5	-15.5	1.46	-14.9	-1.98	2.22	-16.3	-0.18
206	5.20	-2.98	-14.0	1.01	-50.4	-9.91	2.05	-24.9	-3.85	1.99	-22.5	-2.74	0.59	-16.9	-1.72
186				-9.01	-46.6	-11.2	-0.36	-26.9	-4.58	1.13	-22.3	-3.09	0.95	-19.1	-1.97
167				-7.17	-32.3	-8.60	-1.13	-26.6	-5.25	0.12	-22.8	-3.53	0.59	-19.9	-2.17
147				-5.93	-29.1	-8.03	-1.97	-25.3	-5.61	-0.52	-22.5	-4.00	0.0	-20.0	-2.70
128							-2.02	-23.5	-5.94	-0.89	-21.5	-4.42	-0.42	-19.7	-3.09
109							-2.01	-21.9	-6.26	-0.93	-20.0	-4.92	-0.86	-18.9	-3.52
88							-1.76	-19.8	-6.57	-0.82	-17.8	-5.32	-1.04	-17.3	-3.98
70															

σ_1 最大主应力; σ_2 最小主应力; σ_3 环向应力.

环箍单元

部分

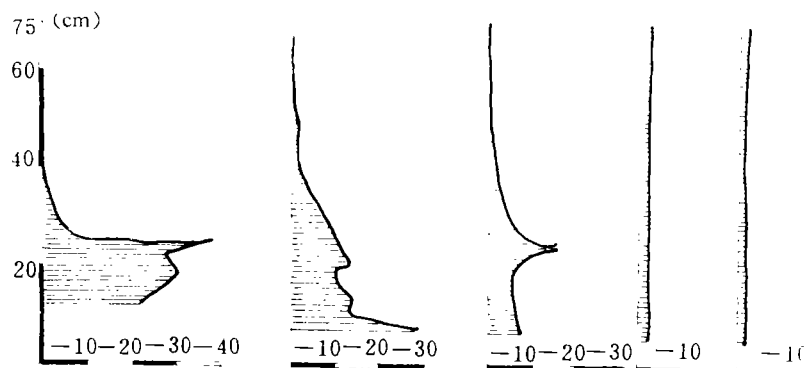
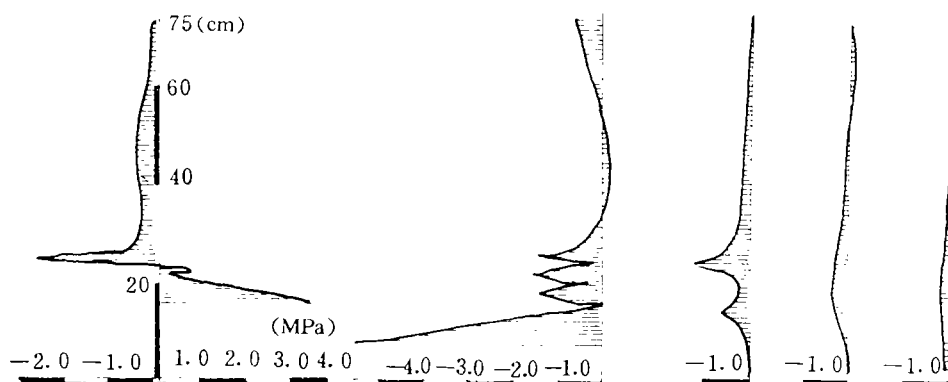
锚具

下为

虚线

续表 1

200.0			243.8			313.8			364.3			479.0			549.0		
σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3
0.23	-2.96	-0.27	0.26	-3.45	-0.90	0.29	-3.79	0.03	0.33	-3.85	0.52	0.42	-3.71	0.70	0.44	-3.55	0.72
0.45	-4.23	-0.28	0.83	-4.64	0.04	0.44	-4.76	0.41	0.44	-4.66	0.57	0.49	-4.27	0.74	0.51	-3.99	0.76
0.57	-5.04	-0.28	0.55	-5.34	0.06	0.51	-5.29	0.43	0.50	-5.10	0.60	0.54	-4.56	0.77	0.55	-4.22	0.78
0.72	-5.97	-0.29	0.68	-6.12	0.07	0.59	-5.86	0.45	0.55	-5.57	0.63	0.59	-4.86	0.79	0.59	-4.44	0.80
0.89	-7.06	-0.29	0.83	-7.08	0.08	0.66	-6.46	0.48	0.62	-6.05	0.65	0.62	-5.16	0.82	0.63	-4.68	0.82
1.08	-8.31	-0.32	1.02	-8.11	1.01	0.71	-7.45	0.51	0.70	-6.81	0.69	0.66	-5.47	0.84	0.67	-4.76	0.84
1.33	-12.3	-0.56	1.67	-10.5	0.16	0.59	-7.73	0.61	0.62	-8.65	0.81	0.47	-6.44	0.89	0.39	-5.90	0.81
0.93	-13.1	-0.61	1.17	-29.8	1.03	-0.69	-24.4	4.02	2.97	-13.5	-7.80	0.60	-7.12	0.82	0.77	-6.46	0.81
1.44	-15.5	-0.68	2.17	-12.6	0.29	2.02	-10.1	0.68	-0.08	-8.18	0.89	0.25	-7.66	0.82	0.30	-6.12	0.88
1.25	-15.8	-0.80	2.26	-12.9	0	0.88	-11.0	0.64	0.50	-9.66	0.90	0.61	-7.22	1.07	0.57	-6.12	1.01
0.86	-16.2	-0.96	1.62	-13.4	-0.18	0.87	-12.2	0.59	0.50	-10.3	0.98	0.63	-7.65	1.14	0.65	-6.31	1.08
0.44	-16.6	-1.19	1.64	-14.5	-0.44	0.93	13.1	0.60	0.41	-10.9	1.06	0.63	-7.99	1.22	0.65	-6.51	1.15
-0.10	-17.2	-1.46	1.56	-14.7	-0.93	1.16	-13.6	0.56	0.16	-11.6	1.14	0.62	-8.30	1.32	0.63	-6.67	1.23
-0.05	-17.6	-1.78	-0.12	-16.8	-1.35	1.74	-13.6	0.62	0.42	-12.6	1.31	0.57	-8.55	1.45	0.55	-6.78	1.34
						1.45	-12.4	0.86	0.47	-16.4	1.27	0.43	-8.70	1.67	0.39	-6.85	1.54
虚线			铺具						0.62	-23.9	1.71	0.06	-8.70	2.07	0.05	-6.85	1.91
			部分														

图2 x 方向截面最小主应力图图3 x 方向截面最大主应力分布图

最大主应力(拉应力)值均小于混凝土的受拉设计强度,在 $x \leq 60$ cm区域里,其值均在1.12 MPa左右,最大拉应力值出现在张拉端的混凝土表面,其值为2.2 MPa,有一个点达到5.6 MPa,出现拉应力的原因可以解释为在锚头张拉受压下沉变形时,混凝土表面因起约束作用而受拉。

2.3 环向应力:图6是 x 方向几个截面的环向应力分布图。在喇叭管口尾翼前面的区域里,环向应力均为压应力,最大环向应力出现在 x 等于60 cm的截面上,最大值达到11.2 MPa,到喇叭管尾翼时环向应力值已接近于零,过了尾翼,环向应力变号,由压变为拉,数值逐渐加大,但变幅平缓,如由 x 等于31.5 cm的截面到 x 等于60 cm的截面时,环向拉应力一般由0.68 MPa增至1.07 MPa。图7是环向应力几个截面延 y 向的分布图。在喇叭管口壁附近一般应力较大,通常都为1.80~2.14 MPa,接近或等于40#混凝土的抗拉设计强度。

2.4 螺旋箍筋的环向应力:螺旋箍筋是作为套箍对受压混凝土产生限制侧向变形作用的。为了计算的方便,将螺旋箍筋以面积相等的原则简化为八个相互不再连续的套环。计算结果表明,离锚头端面最近的两个环箍的环向应力是压力,并未起到设想的限制侧向变形作用,后面六个钢环箍发生了环向拉应力,但一般数值并不大,最大值也只有11.6 MPa,由此看来,钢

箍的“套箍”作用并不是那样明显。钢箍的环向拉应力一般比邻近混凝土的环向应力数值大了十倍左右。

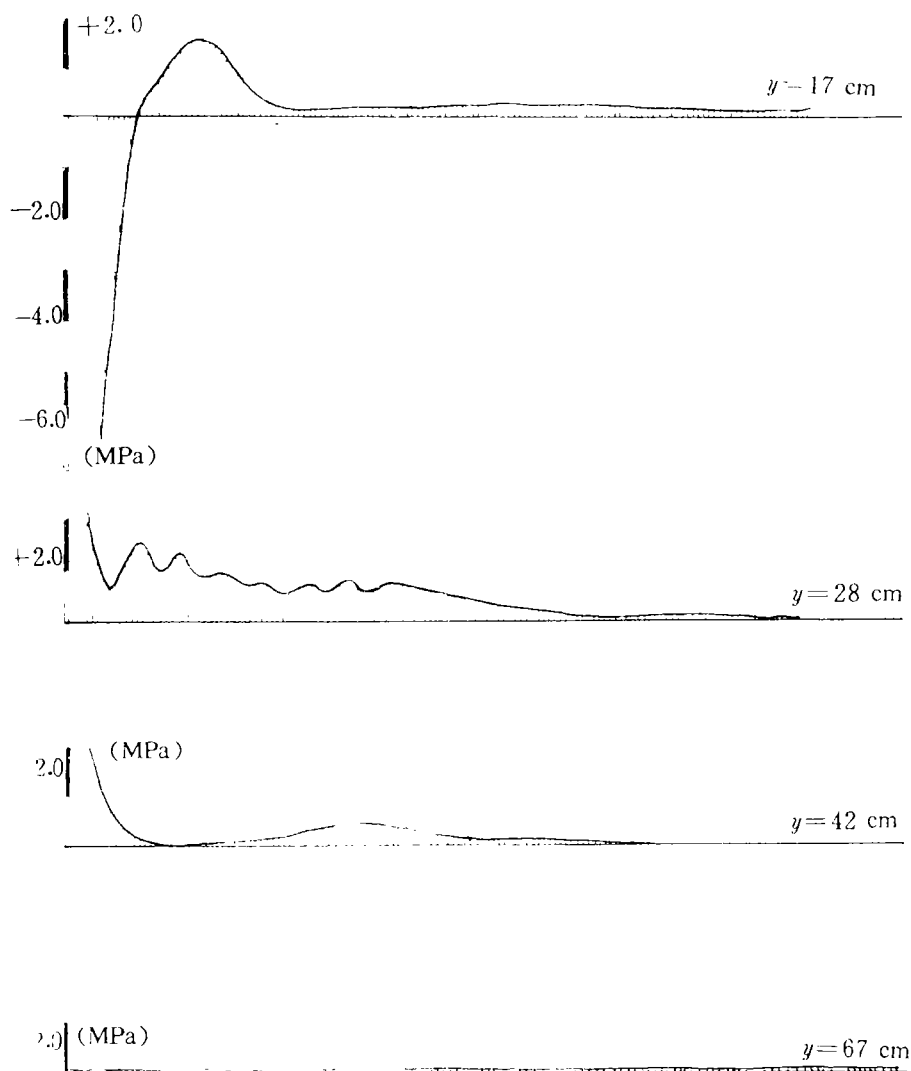


图 4 y 方向截面最大主应力图

2.5 喇叭管的受力分析：喇叭管作为一个承力部件起着良好的作用，喇叭管口最大的主压应力值为 105.1 MPa，发生在喇叭管口前翼墙与管颈壁相连的部位。管颈壁其余部件的最小主压应力一般都在 84.0 MPa 左右。因为喇叭管最大主应力单元均处于三向受压状态，所以强度高，具有很大的安全度。最大主拉应力发生在喇叭管后翼墙及翼尾，最大值约为 7.9 MPa。喇叭管最大环向压应力出现在翼墙的端部，其值为 55.7 MPa。喇叭口其余部位的环向应力随着离开锚垫板的距离加大而逐渐减小，其值一般均超过 22.5 MPa。从尾翼开始，喇叭管开始承受拉应力，一般均小于 11.3 MPa，但在尾翼端部，其值可达 15.1 MPa。

2.6 锚下变形：表 2 给出在张拉端梁端面有关点的变形值，表中所示坐标原点在锚具中心

x 轴朝右为正, y 轴朝上为正.

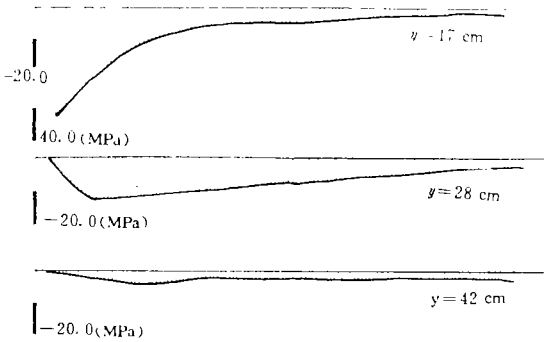


图 5 y 方向截面最小主应力图

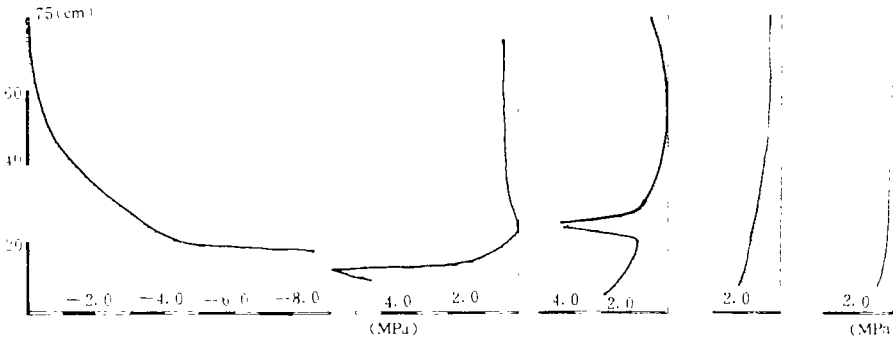


图 6 x 方向截面环向应力图

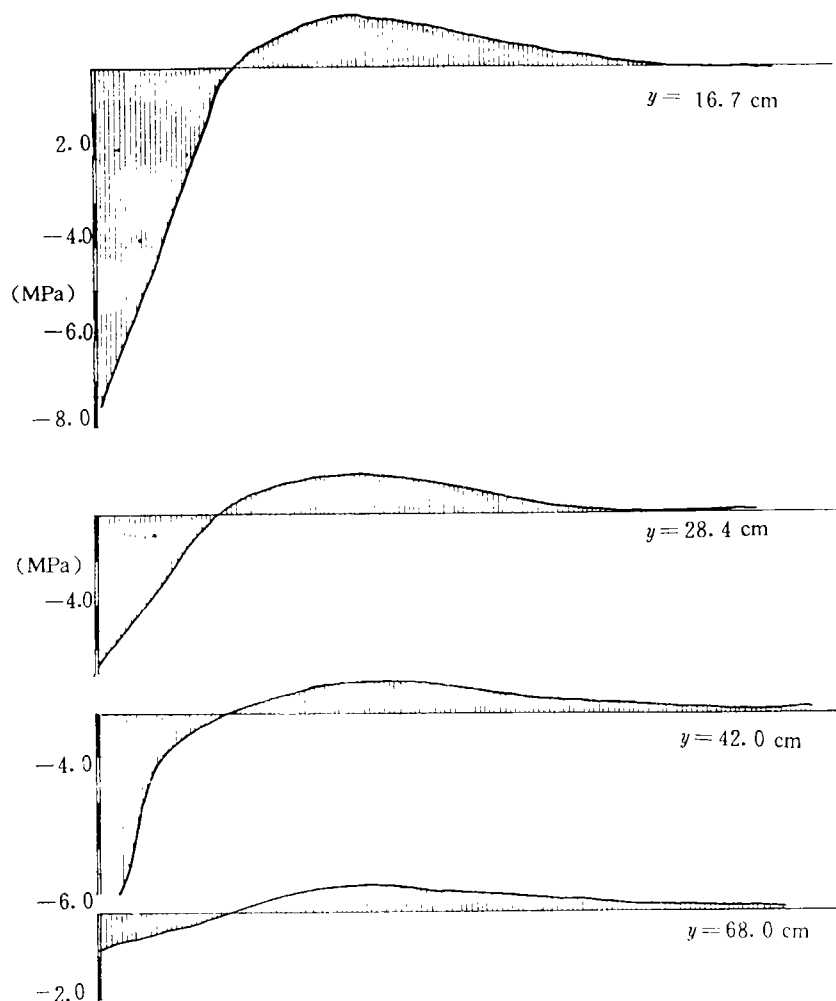
$x=4.4\text{ cm}$ $x=28.0\text{ cm}$ $x=50.0\text{ cm}$ $x=80.0\text{ cm}$ $x=101\text{ cm}$

表 2 张拉端梁端面有关点变形值

$y(\text{cm})$	13.35	15.95	17.85	19.75	22.53	24.43	30.33	42.03
u_x								
$u_x(\text{mm})$	0.244	0.244	0.242	0.238	0.175	0.154	0.117	0.080
$u_y(\text{mm})$	-0.008	-0.008	-0.009	-0.010	-0.036	-0.034	-0.032	-0.024

3 小结和讨论

3.1 如前述,最大的锚下应力大致发生在以锚心为圆心,半径约为 35 cm 的区域里.主压应力值一般都在 25 MPa 以下,极个别点最大主压应力为 50.4 MPa,但考虑到该单元处于三向受压状态,因此抗压强度得以提高,不致破坏.最大主拉应力值一般均在 1.12 MPa 左右,梁端表面个别点出现了 5.6 MPa 的拉应力,但考虑到计算时完全忽略了实际存在着钢筋的影响,因此也不会对梁体造成致害影响.上述两点均为工程实践所证明.发生在喇叭管口壁附近的环向拉应力,最大值接近或等于混凝土的抗拉设计强度,是安全的.其次,喇叭管和螺旋箍筋的各项应力值都不大,远小于材料的容许强度.在锚头受力区,在工程实际中均配有

图 7 y 方向环向应力图

较密的钢筋, 这些钢筋虽属构造钢筋, 但也能起着分布传力作用, 因此, OVM 15-27 型锚具实际是具有较大安全度的。

3.2 文献 [1] 介绍, 素混凝土局部破坏有三种型式, 先开裂, 后破坏; 开裂与破坏同时发生, 试件突然破坏; 局部混凝土下陷。这三种破坏型式虽然存在着明显的差异, 但试件破坏后均冲出楔形体, 楔面上具有明显剪切破坏迹象。配筋试件从开裂至破坏的过程更长, 裂缝多而细, 破坏后承压面下仍有明显的楔形体。

从试件的破坏情况分析后知, 局部承压构件在不同的加荷阶段存在着两种类型的劈裂力: 第一种是集中力向全截面扩散时引起的, 称为“中部劈裂力”; 第二种是楔形体形成过程中由于楔面的塑性剪切变位或滑移引起的, 称为“顶部劈裂力”。目前公路桥规 (JTJ 023-85) 所使用的局部承压计算公式即是以上理论建立计算模型推导分析后得到的。局部承压抗裂性的计算图式如图 8 所示, 当拱的受拉系杆断裂时, 即认为达到开裂荷载。其计算公式是:

$$N_c \leq 0.09\alpha(AR_L + 45 A_g) \quad (1)$$

式中: N_c ——考虑局部承压时的纵向力(kN);

α ——系数;

R_L ——混凝土抗拉设计强度(MPa);

A ——计算截面积(cm^2);

A_g ——间接钢筋截面积(cm^2).

局部承压强度计算图式如图 9 所示. 当楔形块剪切面受剪破坏失去平衡后, 即认为达到局部承压极限强度, 其计算公式是:

$$N_c \leq 0.6(\beta R_a + 2\mu_a \beta_{he}^2 R_g) A_c \quad (2)$$

式中: N_c ——局部承压时的纵向力(kN);

β ——系数;

A_d ——计算底面积(cm^2);

A_c ——局部承压面积(cm^2);

β_{he} ——系数;

A_{he} ——混凝土核心面积(cm^2);

R_g ——间接钢筋抗拉设计强度(MPa);

μ_a ——间接钢筋体积配筋率.

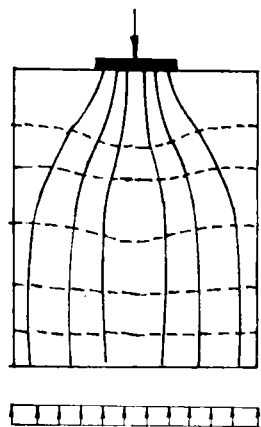


图 8 局部承压抗裂性的计算图式

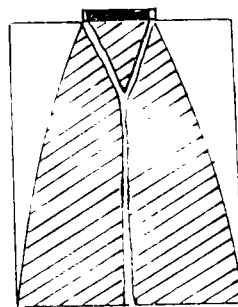
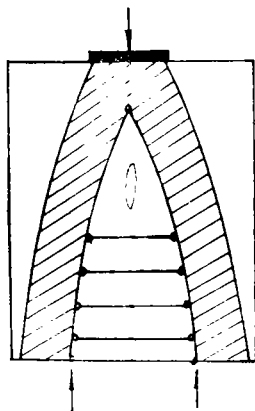


图 9 局部承压强度计算图式

基于上面的分析, 笔者认为目前规范所使用的局部承压公式对 OVM 锚特别是大吨位锚的锚下局部承压强度的验算并不完全适用, 这是因为在达到承压极限状态时, 楔形体将沿受剪面剪切破坏, 据试验知, 楔体斧形锥体两个剪切面的夹角 2θ 大约在 $35^\circ \sim 55^\circ$ 之间, 因喇叭管必然应包含在锥形体内, 所以当取 θ 为 25° 计算后知, 楔形块宽度和楔形块高度都将达到 60 cm 左右, 在达到承压极限状态时, 是否会出现这样一个体积很大的锥形体沿长度达 90 cm 的受剪面破坏是需要进一步试验验证的. 其次, 公式 (2) 的第二项 $2\mu_a \beta_{he}^2 R_g A_c$ 是反映端部间接配筋所提供的总侧向力, 但忽略了作为主体的喇叭管壁所提供的侧向力, 所以在工程设计中, 在计算承压极限状态时很难满足桥规规定的公式 (2) 第二项不得大于相应混凝土承载能力 50%

的这一限制.

3.3 通常在分析锚下应力时, 均作平面应力处理, 即取包含垂直于张拉力方向的最大主应力 σ_1 和与张拉力方向平行的最小主应力 σ_2 的平面, 规范的公式 (1) 计算开裂的模型是在 σ_1 和 σ_2 主应力平面上建立的. 实际在本例中, 拱顶受压范围极小, 在 y 值大于 17 cm 后, 不再存在拱顶受压区. 喇叭管本身也处于受压状态, 只是在喇叭管后面才开始出现拉应力区, 且数值一般远小于抗拉设计强度, 抗裂度很高, 不致出现系杆拱系杆断裂的情况. 真正出现图中所示的开裂模式应该是在第三主应力 σ_3 和 σ_1 平面内, 在该平面内, 拱顶受压区范围较大, 且拱顶厚度为 25 cm 左右, 最大拉应力发生在距锚头约 50 cm 的截面, 其值为 2.07 MPa.

参加本项工作的还有李启炎研究员, 王文涛高工, 高泓工程师. 赵卫东同志协助计算工作, 特致谢意.

参 考 文 献

- 1 刘永颐等. 混凝土局部承压强度及破坏机理. 土木工程学报, 1985, 5
- 2 胡世德. OVM 预应力锚固体体系锚下应力分析. 公路, 1992, 1

Anchorage Stress Analysis of OVM Anchor of 4500kN

Yin dingan

(Bridge Engineering Department, Tongli University)

Abstract

OVM anchor is a new generation of multi-anchor system. it is divided into two models of OVM 15 and OVM 13 and suitable for $\varphi 15.2$, $\varphi 15.7$, $\varphi 12.7$, $\varphi 12.9$ high strength steel strand wires which have the anchor standard strength of 1770 MPa-1860 MPa, and the tensile force can be selected freely over 160kN. Now the maximum tensile force used in our country is 4444.9kN. This article uses the finite element method of PAFEC-FE to analyse the anchor stress of 4500 kN, and gives the datas and the state of distribution of the three-dimentional stresses of anchorage zones and some of the conclusions. Finally, it makes some discussions about the conditions concerning bearing strength in Bridge code (JTJ 023-85).

Key words: multi-anchor system; three dimentional stress of anchorage zones; high strength steel strand wires; bearing strength