

# 核电站安全壳锚固区局部应力研究

桂志光<sup>1</sup> 朱万旭<sup>2</sup> 陶利<sup>1</sup> 付委<sup>2</sup>

(1 广西工学院土木建筑系 柳州 545006 2 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005)

**摘要:**针对核电站安全壳大吨位钢索张拉的结构安全性,用三维有限元方法建立考虑锚具、网格钢筋以及孔道影响的精细分析计算模型,研究了锚固区混凝土的主应力分布状况以及传递机理,结合锚固区混凝土局部承压应力分布规律,为优化锚具结构和降低成本提供理论依据。研究表明,用网格筋代替螺旋筋可以提高试件开裂承载力并可以有效地控制劈裂裂缝的开展;张拉过程中锚具本身的应力低于材料的屈服应力;锚垫板下侧的拉裂破坏是可能导致核电站安全壳专用锚具在钢索张拉过程中损伤的主要破损类型。

**关键词:**核电站安全壳 锚固区 局部承压 有限元分析

核电站安全壳预应力锚固体系,由于要求可靠度非常严格,在2008年之前国内均采用国外产品。随着我国核电站建设规模的扩大,迫切希望脱离对国外技术的依赖,实现锚固体系产品的国产化。由于我国之前的核电站建造主要引用国外成套技术设计,并没有形成自己的核电站建造标准、规范体系,国内核电站预应力系统没有适用的对应规范标准,仅仅按照混凝土结构设计规范GB50010-2002有关局部锚固区部分来计算,可靠性有待商榷。

号称核电站外形结构标志的反应堆厂房安全壳为预应力钢筋砼筒体结构,是核电站防止核辐射扩散的第三道、也是最后一道屏障,预应力分别施加在筒体的环向、竖向和穹顶部,结构预应力的施加与持续有效性直接影响着核电站的核安全性与防止核扩散的可能性。为确保核电站安全壳预应力锚固区的安全性、可靠性,本文以某核电站安全壳筒体的环向、竖向和穹顶部锚固区为研究对象,用精细的三维有限元计算模型,分析采用国产锚具体系的钢筋砼筒体结构在大吨位钢索张拉过程中锚固区混凝土的应力应变分布特征,从而得到确保锚固区安全锚固体系产品。将有限元分析方法用于核电站安全壳锚固区计算,验算国产锚具的安全裕度,在国内尚属首次。

## 1 工程背景

某核电站安全壳为预应力钢筋混凝土结构,由底板、筒体墙、环梁和穹顶四部分组成,对预应力的施工质量提出了很高的要求。预应力系统

钢绞线束分布在核安全壳结构的基础底板、筒体墙、环梁和穹顶。筒身墙内预应力钢束分竖向、水平向两个方向:竖向预应力钢束100~200束,全部呈直线单排垂直布置在筒身墙内中间位置,每束长度约50m,孔道平均间距一般为1200mm,钢束的上端锚固在环梁顶部、下端锚固在预应力施工廊道的顶面。环向钢束146束,环绕筒身1/2或1/4圆周呈单排布置在筒身墙内,钢束的两端锚固在扶壁柱的两侧。环梁钢束约20束,分上、下两层,呈双排布置在环梁内,每根环绕1/2圆周,钢束的两端锚固在环梁的外侧。穹顶钢束100~200束,分三层三个方向分别布置在外穹顶内,钢束的两侧锚固在环梁的外侧。

根据核电站对锚具的特殊要求,本项目采用国内最为著名的预应力锚固体系—OVM锚固体系中的OVM15R系列,引用了国际FIP93规范、国标GB/T14370-2000及核行业标准EJ/T926-95、EJ/T998-96。

如图1所示,OVM15R系列锚具由工作锚板、工作夹片、锚垫板、锚具密封罩组成。锚具通过工作夹片与工作锚板锥形孔的楔形作用夹持住钢绞线,钢绞线的拉力通过工作锚板、锚垫板传至锚下混凝土构件。预应力孔道灌浆由锚垫板上的灌浆孔灌注,锚具密封罩内的灌浆由密封罩的中心孔灌注。锚具技术参数如表1。

根据具体工程设计需要,除竖向选用OVM15R-37型锚具,水平环向、穹顶等选用OVM15R-19型锚具。本项目着重利用计算机有限

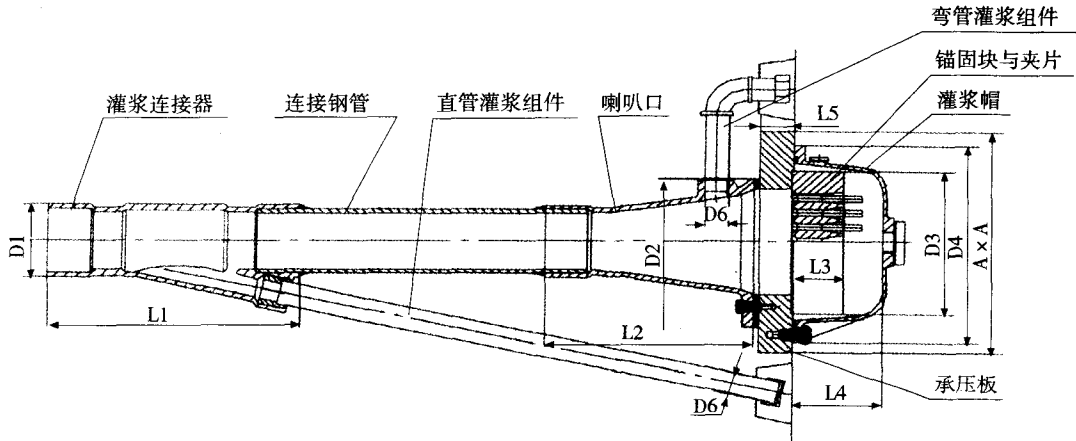


图1 锚具结构组装图

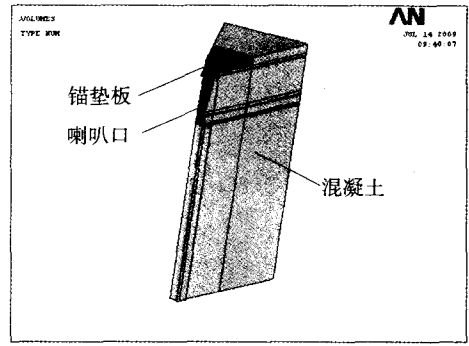
表1 锚具技术参数

锚具规格	灌浆连接器		喇叭口		锚固块		灌浆帽		承压板		灌浆组件
	D1	L1	D2	L2	D3	L3	D4	L4	A x A	L5	D6
OVM15R-19K	φ 126	440	φ 194	347	φ 217	75	φ 290	110	350 x 350	50	G1"
OVM15R-37K	φ 166	498	φ 280	115	φ 320	105	φ 470	179	495 x 495	75	G1" 1/2

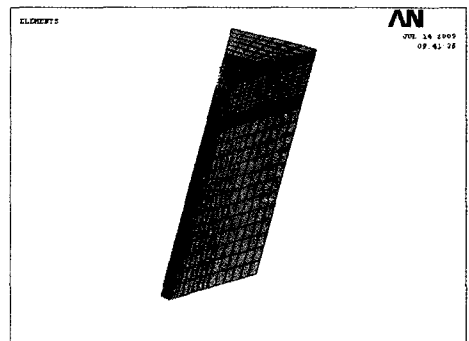
元分析技术，对具体的安全壳混凝土锚固区进行分析，找出锚具的受力薄弱环节，以指导产品优化。

## 2 有限元模型与计算结果分析

本文采用大型商用软件ANSYS建立锚下应力分析的有限元计算模型。为了在不影响模型的总体受力的前提下减少计算单元的数目，本模型中锚垫板的有些圆角未建模，根据结构的对称性取模型的1/8进行计算分析。锚垫板按实际尺寸建模，37束和19束钢绞线锚固区混凝土分别按1120 × 1120 × 1800mm和600 × 600 × 1200mm建立混凝土模型，锚固区的远端按固结条件处理，锚垫板和喇叭口与混凝土之间，采用接触处理，摩擦系数取0.65；锚垫板和喇叭口采用接触处理的摩擦系数为0.2。图2为有限元结构模型及网格划分的情况，混凝土采用8节点三维实体单元SOLLID65进行空间模拟应力分析，锚垫板和网格筋选用SOLLID45单元模拟。OVM15R-37型锚下单元总数为4296，其中混凝土实体单元数为3756，单个锚杯的单元数为540，OVM15R-19型锚下单元总数为1848，其中混凝土实体单元数为1488，单个锚杯的单元数为360。另外，假设材料为连续均匀的，混凝土（取C40混凝土）的弹模为E=34GPa，泊松比 $\mu=0.17$ ；锚垫板的材料为



(a) 结构模型



(b) 网格划分

图2 有限元结构模型及网格划分

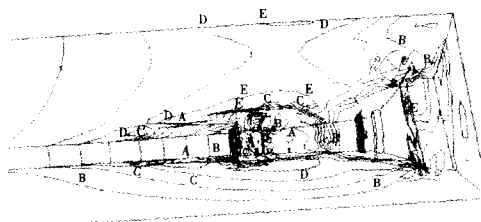
HT200，弹模取 $E=120\text{GPa}$ ，泊松比 $\mu=0.3$ ；网格筋为Q235，弹模 $E=200\text{GPa}$ ，泊松比 $\mu=0.3$ 。

建立模型时，由于锚垫板、网格筋与锚下混凝土存在着复杂的传力关系，所以结合在一起采用整体式模型建模，与分离式、组合式不同的

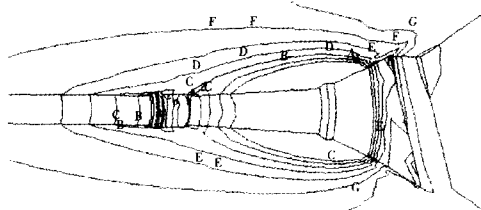
是，它是假设钢筋均匀分布在混凝土中，一次求得综合了钢筋和混凝土的刚度矩阵。

图3(a)为终张拉完成后37孔锚下混凝土的主拉应力等高线计算结果。结果显示锚下的混凝土应力场非常复杂，混凝土拉应力较高的区域分布在两个地方：第一个高主应力区是在锚垫板的下侧喇叭口端部区域，主拉应力一般为3.2MPa左右，部分超出了4MPa，但由于有网格箍筋紧，所以混凝土还可以承受锚垫板传递过来的应力而不至于破坏。另一个高主拉应力区发生在混凝土侧面距端面1/2试块宽度处，最大横向迸裂拉应力约为3.1MPa，小于混凝土可以承受的抗拉强度(4MPa)。

37孔锚下混凝土锚固区内混凝土主压应力分布图如图3(b)所示，结果显示，锚垫板下混凝土的压应力分布梯度较大且应力水平高，在锚垫板下侧较小的范围内混凝土的主压应力超出了C40级混凝土的抗压强度标准值26.8MPa，通过材料非线性的力学行为使压应力集中处的混凝土应力转移到应力较小的区域，使预应力趋于平均传递。除上述锚垫板下侧以外，末端的肋板下侧混凝土内也出现了相对较高的压应力。



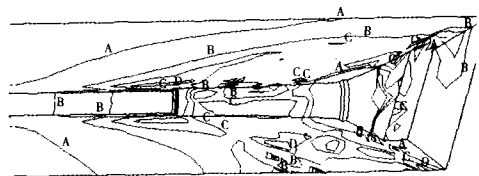
(a) 主拉应力等高线 (A=0, B=0.8, C=1.6, D=2.4, E=3.2)



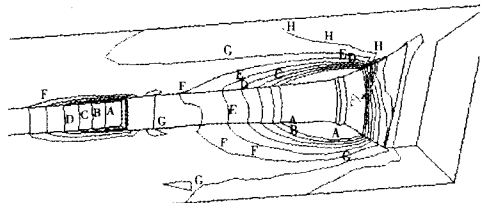
(b) 主压应力等高线 (A=-40, B=-35, C=-30, D=-25, E=-20, F=-15, G=-10, H=-5)

图3 37孔锚具锚下混凝土应力

图4为19孔锚具的锚下结构主应力分布，主拉应力以及主压应力分布与37孔锚下应力分布十分相似，在锚垫板的下侧喇叭口端部区域和混凝土侧面距端面1/2试块宽度处出现较大主拉应力。最大主压应力发生在锚垫板下侧较小区域内。



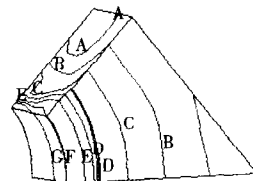
(a) 主拉应力等高线 (A=0, B=1, C=2, D=3, E=3.3)



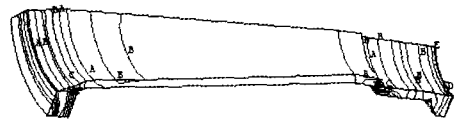
(b) 主压应力等高线 (A=-40, B=-35, C=-30, D=-25, E=-20, F=-15, G=-10, H=-5)

图4 19孔锚具锚下混凝土应力

图5为37孔应力分布，结果显示锚垫板的应力梯度比较大，锚垫板承压面位置应力较大，达到270MPa，小于屈服极限为355MPa，锚垫板外侧应力值较小，未充分发挥材料性能；喇叭口为铸铁件，其材料抗压强度极限比抗拉强度极限高2倍左右，因此，用最大拉应力判断该结构的安全性，从图5可以看出锚垫板所受拉应力比较小，最大处的应力值48.3MPa远小于HT250的标准抗拉强度250MPa，所以喇叭口比较安全。图6为19孔应力分布，结果显示其与37孔十分相似。



(a) 锚垫板mises应力等高 (A=40, B=78.3, C=116.7, D=155, E=193, F=231, G=270)



(b) 喇叭口拉应力等高线 (A=0, B=1.7, C=13.3, D=25, E=36.7, F=48.3)

图5 37孔锚垫板及喇叭口mises应力

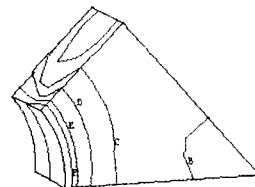


图6 19孔锚垫板mises应力等高线

(A=0, B=37.1, C=74.3, D=111, E=148.6, F=185.7, G=222, H=260)

### 3 试验验证

由前面分析可知,混凝土侧表面1/2试件宽度处横向拉应力较大,可能导致锚垫板下侧混凝土发生拉裂破坏,是核电站安全壳专用锚具在钢索张拉过程中损伤的主要破损类型。为了解锚下混凝土受力的真实情况和该区域是否萌生裂纹,本文对该模型进行了足尺寸试验(如图7)。通过实验可知,在纵向预应力张拉过程中,锚垫板下侧未发现可见裂缝,表明用网格筋代替螺旋筋可以提高试件开裂承载力并可以有效地控制劈裂裂缝的开展。为了对比分析,本文在混凝土侧面距离锚垫板外表面1/2试件宽度处贴应变片,在有限元模型的对应位置通过定义路径来获得应变值,然后取试验应变值平均数和有限元模拟值进行对比分析(结果如图8)。结果显示,有限元计算应变值呈线性,而试件的应变在加载较小时也是线性的,且试验值与有限元计算值很接近,表明计算假定基本符合实际情况,所建立的有限元模型是合理的。

虽然通过定义摩擦系数来模拟锚杯与混凝土之间的接触能够满足计算要求,但锚杯与混凝土之间的粘结力是有一定限度的,所以,为了进一步与实际情况相吻合,在这些接触节点上和接触面的地方应该控制相应的切应力。

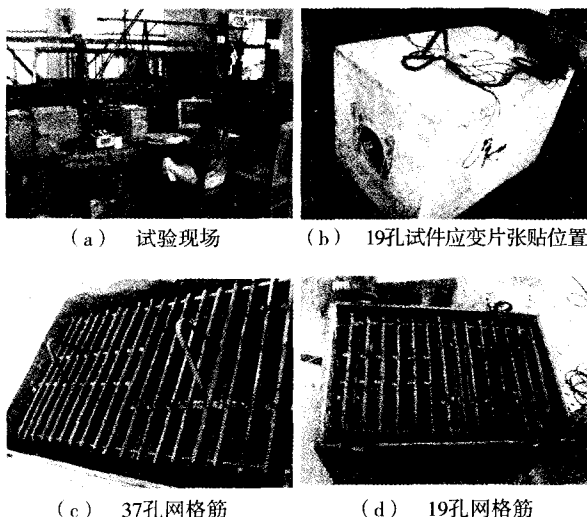


图7 试验情况

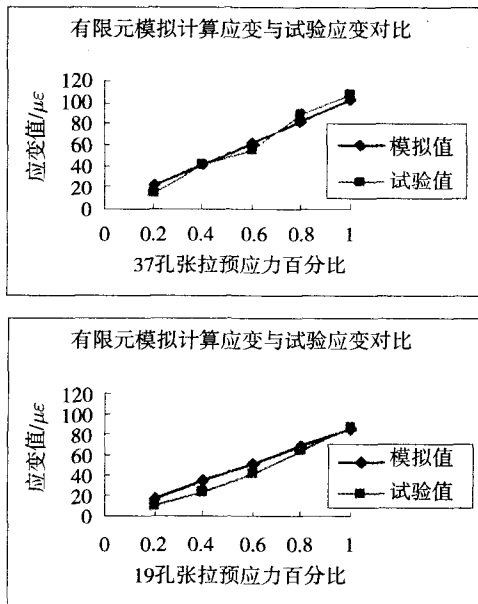


图8 有限元计算应变与试验应变对比

### 4 结论

(1) 锚垫板及锚下结构满足安全要求。张拉过程中锚垫板及喇叭口的应力远低于材料的屈服应力,锚垫板下侧局部出现较大的拉应力和压应力,但分布区域较小。

(2) 混凝土侧表面1/2试件宽度处横向拉应力较大,需要重点关注。

(3) 锚垫板外侧较大区域的综合应力不足100MPa,低于材料强度的1/3,锚垫板有进一步优化空间,而锚垫板上最大应力集中在锚垫板与喇叭口接触处,在完善锚垫板尺寸时应给予更多的重视。

#### 参考文献

- [1] 《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB10002.3-2005). 北京:中国铁道出版社, 2005.
- [2] 清华大学建工系. 大吨位预应力锚固区域混凝土局部承压问题的研究[M]//中国建筑科学研究院钢筋混凝土结构研究报告选集. 北京:中国建筑工业出版社, 1981: 255-288.
- [3] 朱万旭, 刘广松. HVM型锚固体系锚具的研制[J]. 结构工程师, 2000, z1 P 647-657.
- [4] 陈文琳, 聂会星. 预应力锚圈的弹塑性有限元分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), Vol.30 No.6 Jun.2007.
- [5] 陈嘉毅, 谢旭. 大跨预应力混凝土箱梁锚固区局部应力研究[J]. 浙江大学学报(工学版), Vol.43 No.6 Jun.2009.
- [6] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范(GB50010-2002)[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.