

预应力锚垫板结构优化设计

马倩¹, 朱万旭^{1,2}, 苏海霆¹, 付委², 杨宝栋¹

(1. 广西科技大学土木建筑工程学院, 广西 柳州 545006; 2. 柳州欧维姆机械股份有限公司, 广西 柳州 545005)

摘要: 预应力混凝土结构应用范围的扩大对锚下混凝土结构的安全性提出了更高的要求。根据南水北调中线干线工程预应力设计中对于锚垫板的锚具要求, 对 OVM 锚固体系中 YM-M15E-12D 进行优化改进分析, 提出优化设计思路, 确立新型锚垫板 M15CJ-12D 的结构形式, 对新结构进行 ANSYS 分析, 并与原结构进行有限元对比分析, 且通过荷载传递试验测试构件的性能及检验其安全性, 对比分析锚下混凝土结构试验应变值跟模拟应变值, 验证模拟的各项参数符合实际工况, 最终得到更为安全、先进、经济的锚下混凝土结构体系。

关键词: 锚垫板; 锚下混凝土结构; 荷载传递试验; ANSYS; 对比分析

中图分类号: TB115

文献标志码: A

在预应力锚固体系中, 锚下混凝土结构所能承受的荷载将直接影响预应力的效果^[1]。研究表明: 在张拉设计吨位、锚具布置位置和锚下混凝土强度等级已经确定情况下, 锚垫板的结构形式将会直接影响到锚下混凝土的应力分布状况^[2]。针对南水北调中线干线工程在预应力设计方面要求预应力筋最大张拉力大于 1500 kN 时, 锚垫板锚具槽下最小厚度允许值 ≥ 25 mm。为了确保预应力锚固体系的安全及合理性, 本文对 OVM 锚固体系中 YM-M15E-12D 进行优化改进分析, 根据锚下混凝土应力的分布特征与荷载传递试验, 验证锚下混凝土结构与锚垫板的安全性, 并为优化锚具结构和降低成本提供有限元分析与实验依据。

1 优化设计思路

1.1 南水北调中线干线工程锚垫板要求

预应力技术在我国调水工程中已广泛使用^[3], 为确保预应力工程的施工质量, 根据南水北调中线干线工程对于锚垫板的要求, 对于 OVM 锚固体系中 YM-M15E-12D 型锚垫板优化时要考虑到以下要求^[4]: (1) 锚垫板上的锚具槽应与锚具和喇叭口同轴, 偏差 ≤ 2 mm, 表

面光滑, 倾斜 $\leq 0.5^\circ$ 。安装测力计的锚垫板, 锚具槽应与测力计的专用垫板相匹配。(2) 锚垫板宜选用加肋锚垫板, 锚具槽下的最小厚度应符合表 1 中的规定, 锚具槽下面的最小厚度如图 1 所示。OVM 锚固体系中 YM-M15E-12D 承受的荷载大于 1500 kN, 所以优化后锚垫板锚具最小厚度允许值要满足 ≥ 25 mm 的要求。YM-M15E-12D 锚垫板的构造图如图 2 所示。

表 1 预应力筋不同张拉力下锚垫板锚具槽下部最小厚度允许值

序号	预应力筋最大张拉力 (kN)	锚垫板锚具最小厚度允许值 h(mm)
1	≤ 1000	≥ 15
2	≤ 1500	≥ 20
3	> 1500	≥ 25

根据 JT/T329-2010 规范规定^[5]: 锚垫板的长度应保证钢绞线在锚具底口处的最大折角不大于 4 度。锚垫板的构造尺寸应能满足预应力能可靠地从锚具传递到混凝土构件中。

1.2 受力性能优化

锚垫板结构形式是解决局部受压问题主要影响因素, 其结构形式的合理布置能够解决锚下混凝土的应力

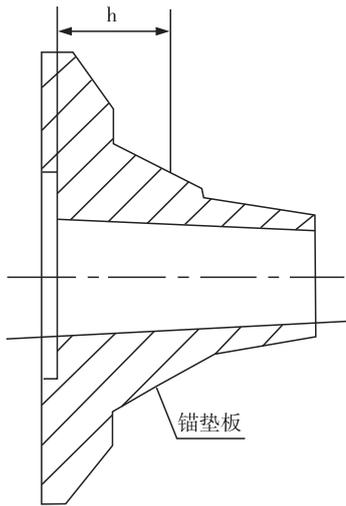


图1 锚垫板锚具槽下部最小厚度示意图

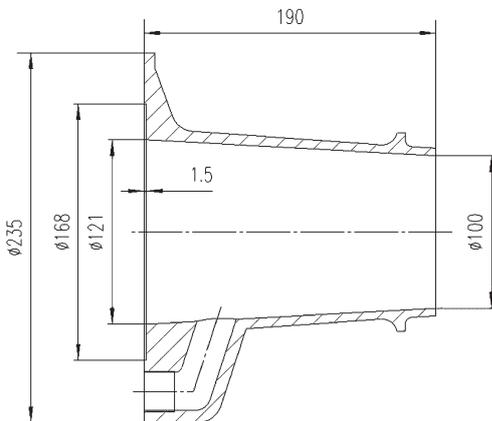


图2 YM-M15E-12D 锚垫板构造图

集中、开裂及变形问题^[6]。锚垫板的应力集中区域主要分布于承压底面,因此在对 YM-M15E-12D 锚垫板优化时,将多台阶结构布置到承压底面,这样不仅解决了应力集中所带来的不利因素,而且充分利用了台阶的良好传力性能,节省了材料。合理地增大锚垫板与混凝土的承压投影面积,有利于荷载的均匀传递,更有利于锚垫板与混凝土的协同工作,适用性更高。

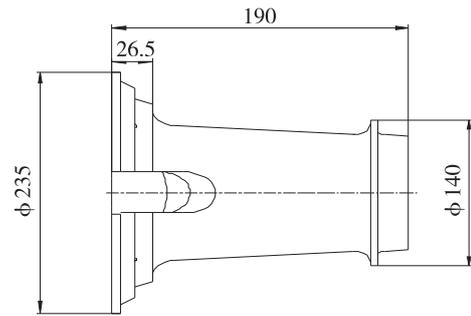
1.3 M15CJ-12D 新型锚垫板的提出

在满足南水北调工程对于锚垫板的要求的基础上,针对以上提出的优化设计思路,经过对 YM-M15E-12D 锚垫板优化设计,提出紧凑型阶梯状锚垫板结构形式 M15CJ-12D 新型锚垫板,构造图如图 3 所示。

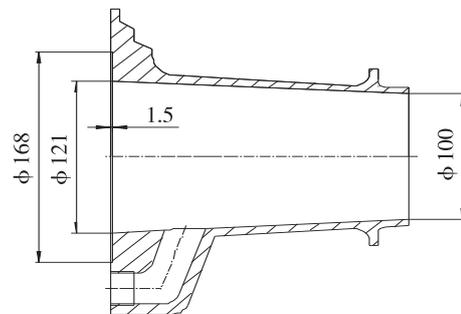
2 锚下混凝土结构 ANSYS 分析

2.1 模型概况

为保证新旧两种结构模型具有可对比性,除锚垫板的结构形式不同外,其他参数设置应尽量保持一致。根



(a) 侧视图



(b) 中心对称轴剖面图

图3 M15CJ-12D 锚垫板构造图

据实际情况混凝土为 C50,尺寸取 480 mm × 480 mm × 1000 mm,螺旋筋取 Q235 线径 Φ12 mm,中径 Φ214 mm,间距 50 mm,共 5 圈。在锚垫板上施加实际工程应用的最大荷载(钢绞线标准强度的 0.75),即 $260.4 \times 12 \times 0.75 = 2343.6$ kN。基于模型的对称性,取 1/8 部分建模,锚垫板和混凝土之间用接触模拟,摩擦系数取 0.65,其它间接钢筋与混凝土作为一体计算。锚垫板模型选取 solid185 实体单元划分六面体网格;混凝土选取 solid65 实体单元划分六面体网格;螺旋筋选取 pipe16 管单元划分网格。在对称面施加对称约束,远端地面施加支撑约束。材料属性参数值见表 2。整体结构有限元模型如图 4 所示。

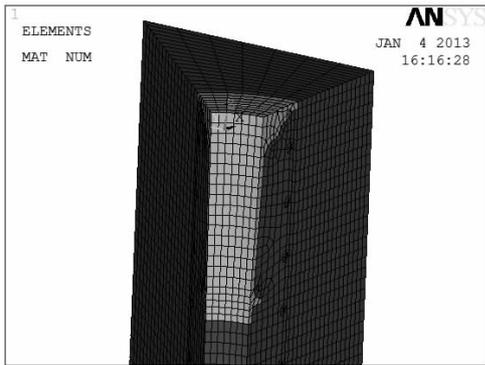
表2 材料属性

锚垫板		混凝土试件	螺旋筋
YM-M15E-12D	M15CJ-12D	C50	Q235
E = 120GPa	E = 120GPa	E = 34.5GPa	E = 200GPa
泊松比 u = 0.3	泊松比 u = 0.3	泊松比 u = 0.167	泊松比 u = 0.3

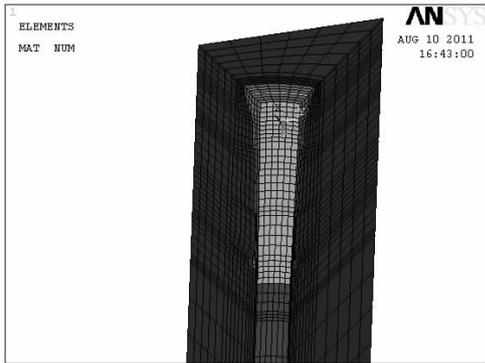
2.2 有限元结果分析与比较

2.2.1 锚下混凝土

在后张预应力构件的顶部,强大的预压力通过锚垫板将力传递到混凝土上,锚下混凝土承受很大的局部应力,研究表明锚垫板下部区域和混凝土试件侧表面的应力较大,其破坏形式主要是侧表面拉应力过大造成构件开裂^[7],它可能使构件产生纵向裂缝,所以,混凝土的局

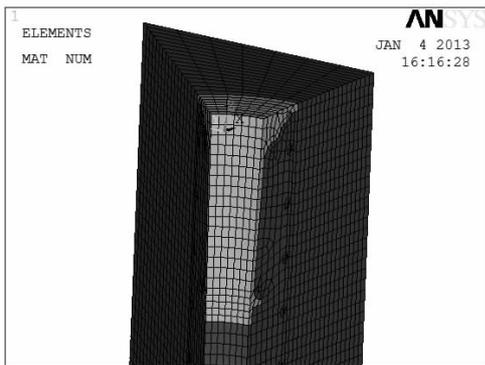


(a) M15CJ-12D锚垫板

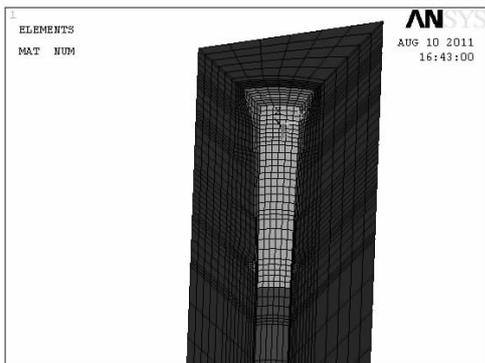


(b) YM-M15E-12D锚垫板

图 4 有限元结构模型



(a) M15CJ-12D锚垫板

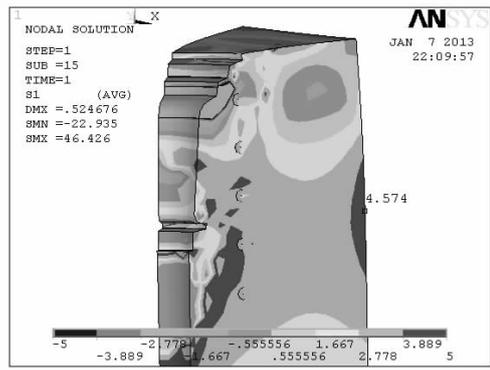


(b) YM-M15E-12D锚垫板

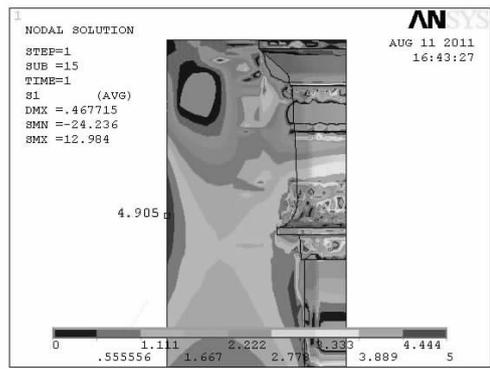
图 4 有限元结构模型

部抗裂和承压的能力是需要研究的重要内容。

经 ANSYS 分析得出 M15CJ - 12D 型和 YM - M15E - 12D 型锚垫板的锚下混凝土主拉应力云图(第一主应力),如图 5 所示。由图 5 可知,两者的共同点为,锚下混凝土开裂的主要原因为其侧表面的主拉应力较大,而最大拉应力的位置主要出现在锚垫板的喇叭口末端,按混凝土的特性,其抗拉强度极限为混凝土抗压强度极限的 1/12 ~ 1/15,即 5 ~ 6 MPa。对其进行弹塑性分析时结果显示混凝土都没有出现等效塑性拉应变,证明此时的混凝土拉应力没有达到拉伸屈服极限,混凝土试件显然能够达到抗裂性要求。因此,主要根据计算出来的侧表面的拉应力极值来判断混凝土试件的安全性。



(a) M15CJ-12D型锚下混凝土



(b) YM-M15E-12D型锚下混凝土

图 5 锚下混凝土第一主应力图

两者的差别在于,M15CJ - 12D 型(多台阶)锚下混凝土侧表面拉应力比较小,最大处为 4.574 MPa,而 YM - M15E - 12D 型锚下混凝土虽然其拉应力未超过抗拉强度极限 5 MPa,但锚下混凝土侧表面拉应力较大,最大处为 4.905 MPa。M15CJ - 12D 锚固体系的混凝土试件比 YM - M15E - 12D 锚固体系的混凝土试件更加安全。

混凝土侧表面进行测试拉应力的变化如图 6 所示,在混凝土试块一定的情况下,无论何种结构形式的锚垫板,其混凝土的最大拉应力都会出现在离锚垫板端部 170 mm 处(约在喇叭口尾端处),说明 M15CJ - 12D 型

的适用性更为突出。

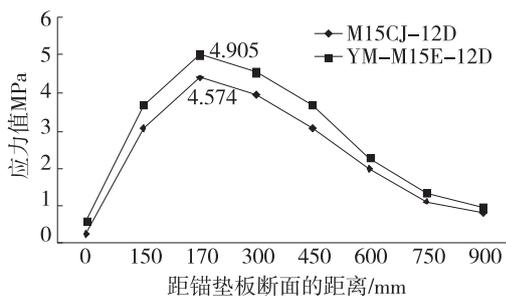


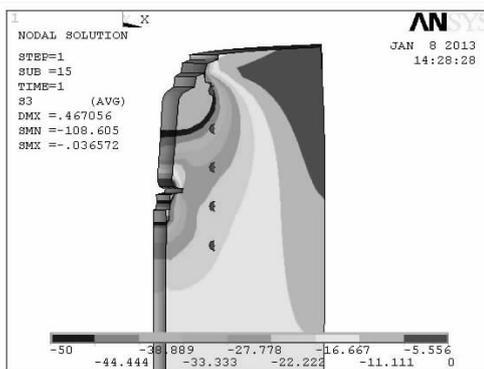
图6 混凝土侧表面拉应力对照

对于混凝土的压应力,如图7所示,两种锚固体系的混凝土中心部位的压应力较大,与锚垫板直接接触的地方有应力集中现象,局部区域超过50 MPa(灰色区域),但是由于有螺旋筋等箍筋的存在,能很大程度承受锚垫板传递过来的压应力,使混凝土不至于破坏。另外,本次计算没有考虑混凝土内加强筋的作用,实际工程中,构件内除了螺旋筋外,还会分布很多加强筋,这可以减小混凝土的拉应力,增强混凝土承受压应力能力,所以,实际工程中本结构应该是安全可靠的。M15CJ-12D型锚下混凝土压应力最大值为108.605 MPa,与YM-M15E-12D型锚下混凝土压应力最大值122.703 MPa相比减少了14 MPa,且应力集中扩散面积增大,验证了M15CJ-12D型多台阶锚垫板的优越性。

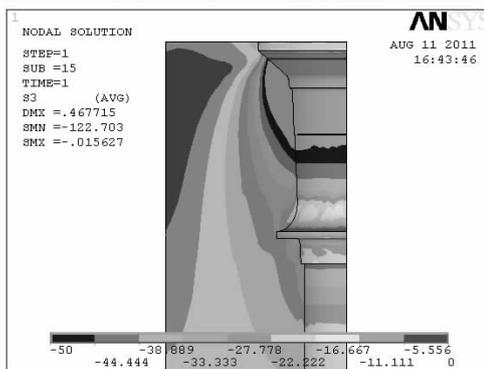
2.2.2 锚垫板

锚垫板的结构形式是影响整个锚下混凝土结构的关键因素,锚垫板所使用的材料为铸铁,其极限抗拉强度为200 MPa。锚垫板的应力分析如图8所示,M15CJ-12D锚垫板所受最大拉应力为92.473 MPa,YM-M15E-12D锚垫板所受最大拉应力为142.664 MPa,均小于其极限抗拉强度,结构都在安全范围内,但YM-M15E-12D型锚垫板的最大拉应力较大,且应力较为集中(红色区域),M15CJ-12D型应力相对分散,所以M15CJ-12D型更为安全有效。

螺旋钢筋的锚固性能良好,具有较强的握裹力、良好的可焊性和节省材料等特点,对提高混凝土强度有非常重要的作用,在预应力锚固体系中是必不可少的部分。其应力分布状况如图9所示,最大应力都发生在第二圈的位置,所以该位置是需要监测的重点区域。M15CJ-12D型螺旋筋最大mises应力为46.426 MPa,YM-M15E型螺旋筋最大mises应力为51.249 MPa,都小于其材料Q235的屈服强度235 MPa,说明M15CJ-12D型螺旋筋更安全,也间接体现了多台阶锚垫板的可靠性。

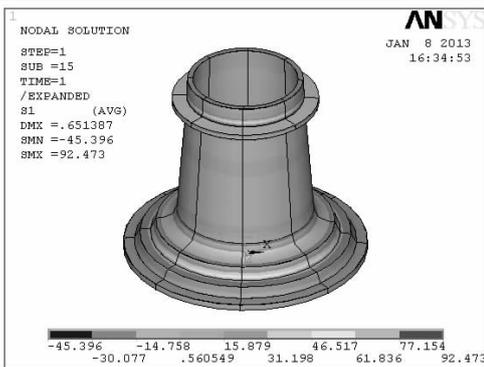


(a) M15CJ-12D型锚下混凝土

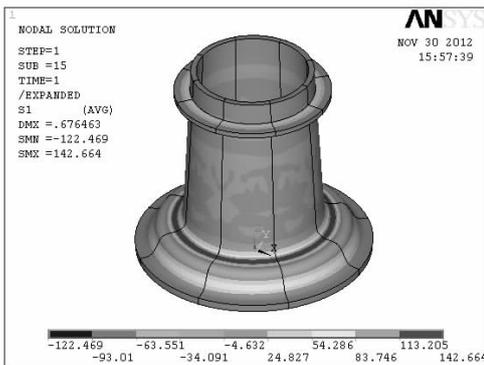


(b) YM-M15E-12D型锚下混凝土

图7 锚下混凝土压应力云图

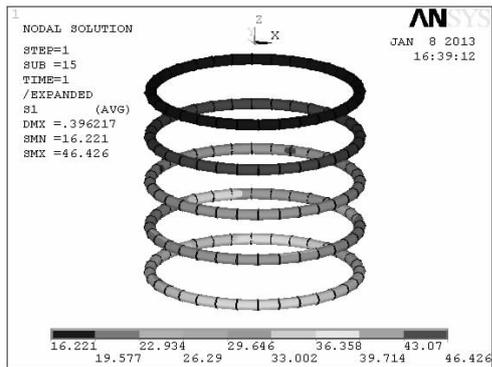


(a) M15CJ-12D型锚垫板

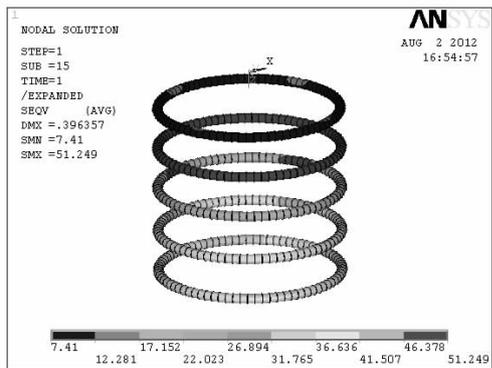


(b) YM-M15E-12D型锚垫板

图8 锚垫板拉应力力图



(a) M15CJ-12D型螺旋筋



(b) YM-M15E-12D型螺旋筋

图 9 螺旋筋 mises 应力图

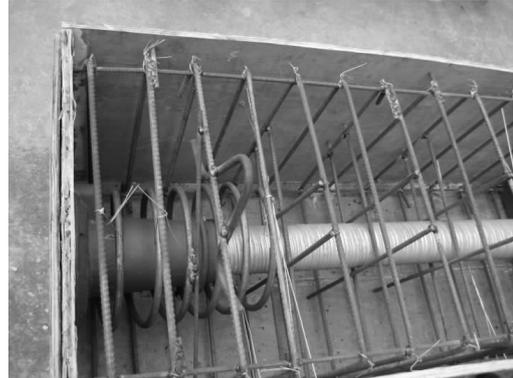
综上所述,锚垫板的结构形态直接影响到锚下混凝土结构各部件的应力变化,通过设计合理的结构形态,可以均匀的分散和减小各部件的应力,而紧凑型多台阶锚垫板能够满足这些要求,其原因是多台阶锚垫板增大了锚垫板与混凝土的接触面积,能够把应力均匀、广泛的传递到混凝土中去,从而减小了应力集中,保证了混凝土的安全。

3 荷载传递试验

为验证锚下混凝土结构的安全性,对 M15CJ - 12D 型锚固体进行荷载传递实验。试验情况如图 10 所示。试验模型与模拟计算的参数相同,荷载按钢绞线抗拉强度标准值的 20%、40%、60%、80% 分级加载,当达到 80% 后,进行 10 次慢速循环加载,上限荷载为 $0.8F_{pk}A_{pk}n$, 下限荷载为 $0.12F_{pk}A_{pk}n$, 循环加载后,逐步增加荷载直至试件破坏。试验显示锚垫板下沉量很小,且锚垫板完好,满足安全要求。

根据试验数据表 3 及图 11 可知,试件破坏荷载均大于 1.1(3437.28 kN),最大裂缝宽度为 0.18 mm,最后 2 次荷载循环应变小于 5%,裂缝宽度增量未超过 0.02 mm,满足规范 JT/T329 - 2010 中的相关要求。为了对比分析,在混凝土侧面距离锚垫板外表面 1/2 试件宽度

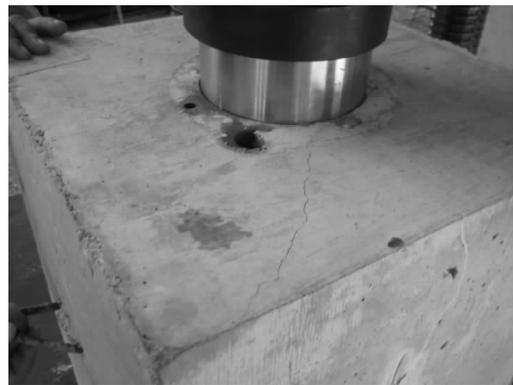
处,每个面横竖各贴一个应变片,张贴完应变片后用胶带粘住有焊接的一侧,可以使之固定和绝缘。取此处沿加载方向的试验应变平均值与有限元模型对应位置的应变值进行对比分析。



(a) 锚具及钢筋分布



(b) 试验现场



(c) 试件加载

图 10 试验情况

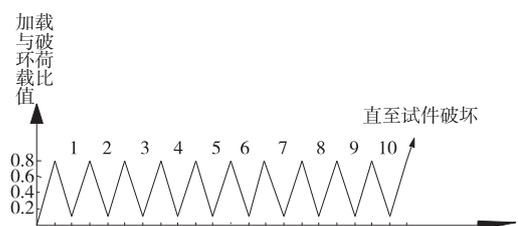


图 11 荷载传递实验加载过程

表3 试验数据

检验项目	标准允许值	试件编号		
		1	2	3
第一次达到上限荷载裂缝宽度(mm)	≤ 0.1	0.1	0.1	0.06
最后一次达到下限荷载裂缝宽度(mm)	≤ 0.1	0.08	0.06	0.08
最后一次达到上限荷载时裂缝宽度(mm)	≤ 0.25	0.2	0.18	0.18
第八到第十次循环上限荷载时裂缝增量(mm)	≤ 0.02	0	0	0
第八到第十次循环下限荷载时裂缝增量(mm)		0	0	0.02
第八到第十次循环上限荷载纵向应变增量(%)	$\leq 5\%$	1.8%	2.6%	3.9%
第八到第十次循环下限荷载纵向应变增量(%)		0	1.8%	3.8%
第八到第十次循环上限荷载横向应变增量(%)		1.8%	2.1%	2.2%
第八到第十次循环下限荷载横向应变增量(%)		1.8%	0	0
破坏荷载 F (kN)	$\geq 1.1F_{pk}$	3459	3450	3830

各锚下混凝土试件的开裂方式基本相同(图12),其中图12(a)为试件端面混凝土开裂形态,在加载过程中出现端部斜裂缝和横向裂缝,裂缝由中部向四周扩展,逐渐延伸到试件侧面,锚垫板在试验中承受两种荷载:一是在压力试验机上施加的局部荷载,另一种为锚下混凝土产生反作用于锚垫板的荷载,直至混凝土试件破坏,锚垫板都未发生开裂,充分说明锚下混凝土结构的安全性。图12(b)为侧面混凝土的开裂形态,其裂缝大多为竖向裂缝,当加载到试件破坏时,裂缝一般延伸至距试件张拉端1/2处。

模型构件为轴对称的模型,所以用有限元做分析时,是采用1/8对称模型,故在张贴应变片处取点,如图13所示,通过有限元中的定义路径取值。试验中由于各种因素的影响,很难做到完全对称。但也比较接近,所以这里取数据的平均值与模拟值进行比较,对模型一次性加载到 $0.8F_{pk}$ 进行分析,根据表4可知,有限元的模拟值与试验值非常接近,说明ANSYS模拟分析比较符合实际试验的情况,所建模型合理可靠。

表4 模拟值与实测值对照

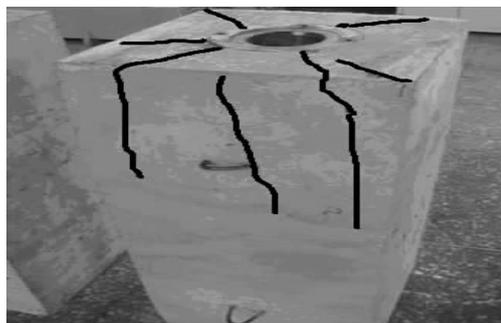
应变测点	试验平均值	模拟值	相对误差
1,3,5,7(横)	50.96	55.3	8.50%
2,4,6,8(纵)	-153.38	-151.8	1.03%

4 结论

本文在原有国产锚固结构的基础上进行优化,设计出更为优越的锚固体系的重要部件(新型锚垫板)。并



(a) 端面



(b) 侧面

图12 试件开裂

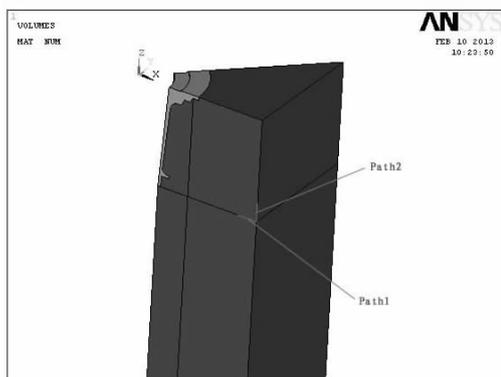


图13 模拟路径定义

参考规范标准建议,对后张预应力锚下混凝土结构从ANSYS模拟与试验两部分分别展开研究,建立了较完整的锚下混凝土结构设计思路。

(1)从三个方面对原YM-M15E-12D型锚垫板进行优化,得到适用性更强,安全性更高的M15CJ-12D紧凑型多台阶锚垫板,有效地缓解了荷载传递带来的应力集中,又节约了材料,比传统阶梯状锚垫板更为经济实用,优化后产品比较原产品,重量减轻了约0.1 kg,因此按照钢材价格及目前柳州欧维姆机械股份有限公司锚垫板的年产量,每年可节省材料费300万左右。

(2)通过ANSYS有限元分析软件对新旧锚下混凝土结构进行对比分析,验证新型锚垫板的可靠性,总结

得出新型锚垫板的优越性。对优化后的 M15CJ-12D 型锚垫板跟原进行有限元比较分析,虽然两种锚垫板和锚下混凝土皆满足规范要求,但新型锚下应力分布更为均匀,锚下混凝土侧表面拉应力相对较小,且混凝土的最大拉应力基本上都会出现在喇叭口的末端,锚垫板的最大拉应力也相对较小。

(3) 为了保证有限元分析的精度,为今后的模拟分析提供可靠的依据,对有限元中的模拟数据进行了探讨。并将模拟值与试验数据相互参照,以验证有限元分析的合理性和准确性。

参 考 文 献:

- [1] 鄞少强.预应力锚固体体系的有限元分析及实验研究[D].广州:华南理工大学,2003.
- [2] ASTM C 939-97, Standard test method for flow of grouts for preplaced aggregate concrete[S].
- [3] 刘土冬,鞠眉周,赵景飞.土层预应力锚索在台儿庄泵站工程中的应用[J].河南水利与南水北调,2012, 22:43-44.
- [4] NSBD-ZXJ-1-01,南水北调中线干线工程预应力设计、施工和管理技术指南[S].
- [5] JT/T 329-2010,中华人民共和国交通运输行业标准[S].
- [6] 彭翰泽.CP1000 型核电站安全壳锚固区优化设计[D].柳州:广西理工业学院,2011.
- [7] GB 50010-2002,中华人民共和国国家标准.混凝土结构设计规范[S].

Optimization Design for Prestressed Bearing Plate Structure

MA Qian¹, ZHU Wanxu^{1,2}, SU Haiting¹, FU Wei², YANG Baodong¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;
2. Liuzhou OVM Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545005, China)

Abstract: With the expansion of application scope of prestressed concrete structure, there has higher request for the safety of the concrete structure under the anchor. According to the requirements for anchor-plate in the design of prestressed in the South-North water transfer middle route project, the optimization and improvement of YM-M15E-D in OVM anchorage system, are analyzed, the optimization design method is put forward, and the structure of new anchor system M15CJ-12D is established. Then the new structure is analyzed by Ansys, the result is compared with its original structure. And its components and safety performance are tested by load transfer test, the strain values of concrete structure, tests and strain values that simulated are compared and analyzed. The results confirm that simulation parameters conform to the actual working condition. Finally a safer, advanced and economic concrete structure system under anchor is obtained.

Key words: bearing plate; concrete structure under anchor; load transfer test; ANSYS; comparative analysis