

钢管混凝土拱梁组合桥拱脚结点应力分析

孙 潮¹, 陈宝春¹, 张伟中², 汤 意², 陈友杰¹, 陈日齐¹

(1. 福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002, 2. 河南省交通规划勘察设计院, 河南 郑州 450052)

摘要: 对一座主跨 100 m 下承式拱梁组合桥进行拱脚结点空间有限元分析和光弹试验. 结果表明, 结点内部应力不大, 设计时配筋不必太复杂, 以节约材料、方便施工; 而在刚度突变处、预应力锚点和支座处应力值较大, 设计时要注意加强这些部位的构造措施与配筋.

关键词: 钢管混凝土; 拱桥; 拱脚; 结点; 有限元; 光弹试验

中图分类号: U441

文献标识码: A

Stress analysis of springing joint in composite bridge of CFST arch and tied girder

SUN Chao¹, CHEN Bao - chun¹, ZHANG Wei - zhong², TANG Yi², CHEN You - jie¹, CHEN Ri - qi¹

(1. College of Civil Engineering and Architectures, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. Henan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Zhengzhou, Henan 450052, China)

Abstract: The space finite element analysis and the three dimensions photo - elastic experiment of springing joint of such bridge with a span of 100m are studied in this paper. The results show that the stresses inside the joint are small, so the reinforced bars inside the joint should not be too complex in order to save material and make convenient for construction. However, the stresses are large in the places where the rigidity changes abruptly, the anchorage devices or supports are acted. Therefore, the structure measurement and reinforcing should be strengthened in the design.

Key words: concrete filled steel tube; arch bridge; springing; joint; finite element; photo - elastic experiment

1 概述

拱桥是我国常用的桥型. 当地质条件较差时, 往往采用系杆来平衡拱的水平推力, 以降低对墩台与基础的要求与工程量. 在近十余年来发展迅速的钢管混凝土拱桥中, 下承式的系杆拱主要有两种类型: 拱梁组合桥和刚架系杆拱^[1]. 两种类型的拱脚结点受力与构造均很复杂. 对于拱梁组合桥, 拱肋在拱脚处与系梁的两端结合在一起, 下设有支座. 结点要承受拱肋与系杆传来的轴力与弯矩、支座的反力和系梁的预应力, 在横向还要承受端横梁的弯矩及预应力. 对于刚架系杆拱, 拱肋与墩(台)帽固结, 拱脚结点要承受拱肋与桥墩(台)传来的轴力与弯矩及系杆的拉力. 在横向还要承受端横梁的弯矩、剪力及预应力. 拱脚结点受力的复杂性与构造复杂性及几何形状的不规则, 使得从理论上求解结点内的应力分布显得非常困难. 因此, 一般采用实验和有限元分析相结合的办法, 定性地找到结点内的应力分布状况, 再据此进行偏安全地采取加强构造措施^[2]. 结点的模型试验有混凝土模型和光弹模型两种, 刚架系杆拱中, 成都青龙场立交桥进行了结点混凝土模型试验^[3], 深圳北站大桥进行了光弹模型试验^[4]; 拱梁组合桥中, 浙江义乌宾王桥进行了光弹模型试验. 但由于拱脚结点的受力复杂性和不具普通性, 因此对于具体的桥梁仍要进行具体的分析. 本文对一座大型的钢管混凝土拱梁组合桥——郑州黄河公路二桥

收稿日期: 2003 - 09 - 03

作者简介: 孙 潮(1970 -), 男, 博士研究生, 讲师.

基金项目: 河南省重大科技资助项目(2001D04)

主桥的拱脚结点进行空间有限元和光弹模型试验分析。

郑州黄河公路二桥主桥是(北)京-珠(海)国道主干线上的一座特大桥,主桥为 8 跨 100 m 的下承式钢管混凝土拱梁组合桥。主拱肋由 2 根 $1\ 000\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ 钢管和腹板组成高 2.4 m 的哑铃形断面。拱肋上、下钢管内浇注 C50 混凝土;拱脚到第一根吊杆间的腹腔内浇注 C50 混凝土,其余部分腹腔内不填充混凝土。拱脚处垂直于拱肋加了 4 条精轧螺纹钢(图 1)。系杆梁采用预应力混凝土箱梁,梁宽 2.0 m,高 2.75 m,配置 16 根 15.24 - 16 预应力钢绞线,采用 OVM15 - 16 夹片锚。端横梁采用预应力箱梁,梁宽 2.9 m,高 3.22 m,配 8 束 15.24 - 9 钢绞线,采用 OVM15 - 9 夹片锚。支座为 1 750 t 盆式橡胶支座。该桥由河南省交通规划勘察设计院设计。福州大学受设计院的委托,对该桥的设计进行了咨询、设计计算并参与了主拱的设计工作,以及包括拱脚结点受力分析在内的针对该桥开展的研究。

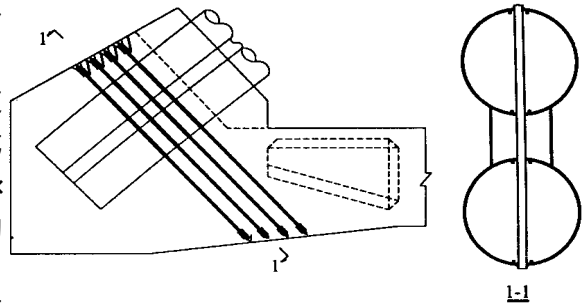


图 1 精轧螺纹钢布置图

Fig. 1 Layout of screw - threaded bar

2 空间有限元分析

2.1 计算模型

根据设计图纸建立有限元模型(图 2),系杆梁边界处约束其纵桥向(即模型中 Z 向)的位移,端横梁边界处约束其横桥向(即 X 向)的位移,支座处约束其竖向(即 Y 向)位移。

用 ANSYS 程序进行计算。模型采用 20 结点块体单元进行网格划分,该单元是高精度块体单元,可用于不规则形体及曲线边界而不失其精度。钢管混凝土拱肋抗压刚度采用 $EA = E_a A_a + E_c A_c^{[1]}$ 。算得钢管混凝土拱肋的弹模 $E = 46.56\text{ GPa}$,泊松比 0.173。C50 混凝土弹模 $E = 35\text{ GPa}$,泊松比 0.167。

用“桥梁博士”软件进行上部结构整体计算,拱脚处拱肋在荷载组合、作用下的弯矩均为负值,即拱腹受压,拱背受拉,轴力均为压力且变化不大。剪力较小,不起控制作用。经分析,取拱肋拱脚内力 N_{\max} 、 N_{\min} 、 M_{\max} 、 M_{\min} 4 种工况作为拱脚结点的荷载工况。

2.2 整体模型应力分析

计算表明,拱肋内力的变化主要影响拱肋与拱脚结点相联处和支座处的局部应力,但应力值变化不大,且不影响受力规律。图 3、图 4 给出了拱脚结点在荷载工况 1 作用下的主应力 σ_1 、 σ_3 云图,从图中可以看出,拱脚结点内部的应力不大。应力值较大的均出现在拱肋、系杆梁与结点相接处和支座、预应力锚点处,它们是由应力集中现象引起的,其中以预应力锚点处的应力集中现象最为明显(图 3 中 A 所示区域是应力超出混凝土设计强度的区域),这主要是因为有限元模型中,预应力值是等效成单个节点集中力作用在计算模型上,而实际结构中锚头下有锚垫板、钢筋网片等分散应力的措施,因此应力集中现象不会象有限元分析中所表现的那么突出。该桥的预应力均采用工厂定型产品,施工图设计时从构造上满足这些产品的技术要求,因此,预应力锚点处的应力满足要求。

用于包住拱肋的后浇混凝土,由于拱肋的力要逐渐传给结点混凝土,因此此处应力集中现象也比

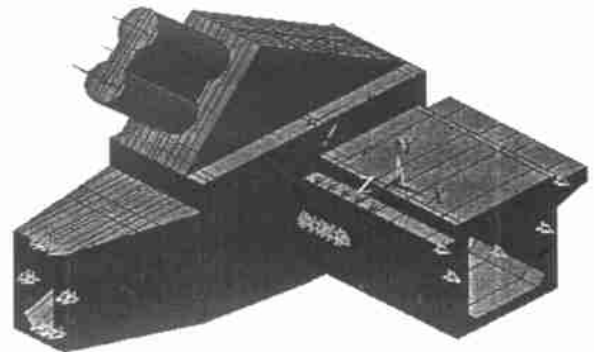


图 2 有限元计算模型

Fig. 2 Finite element model

较明显, 应力等值线密集, 混凝土的应力较大, 有超出混凝土设计强度的应力存在. 建议后浇混凝土采用钢钎维混凝土, 提高其抗拉和抗裂能力, 同时施工中应加强质量保证措施.

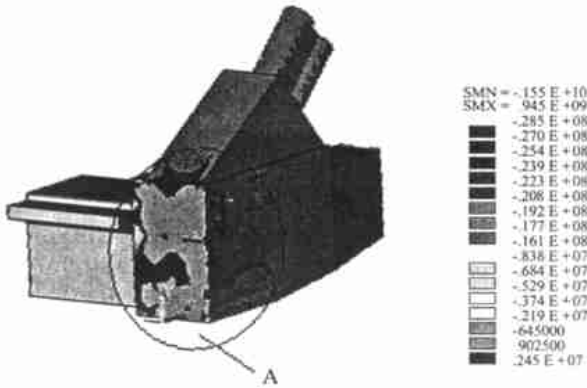


图 3 整体模型₁ 应力云图

Fig. 3 ₁ distribution of total model

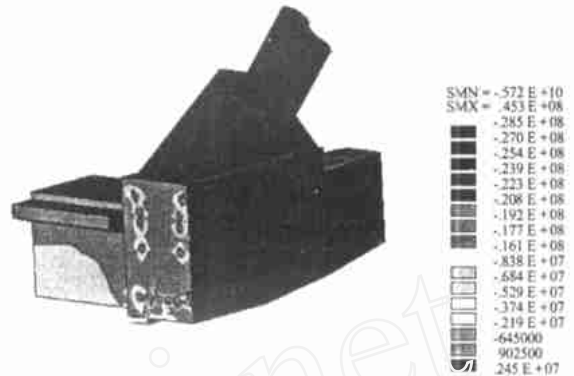


图 4 整体模型₃ 应力云图

Fig. 4 ₃ distribution of total model

2.3 主应力迹线

通过拱肋中心的纵截面是最有代表性的截面. 从图 5 的主应力迹线来看, 精轧螺纹钢对拱脚结点的主应力迹线规律影响很小, 精轧螺纹钢仅对其预应力施加处的局部受力有一定的影响, 对结点内部的受力影响不大.

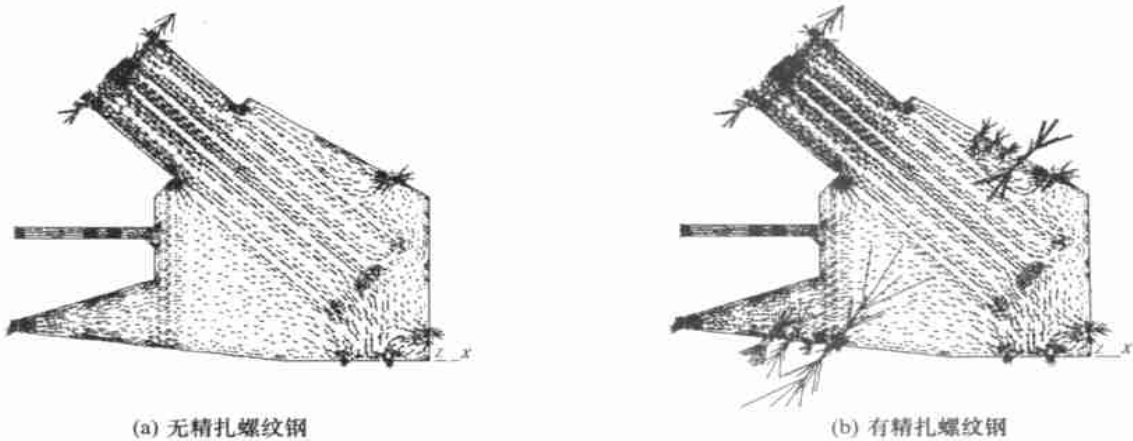


图 5 主应力迹线图

Fig. 5 Principal stress trace

拱肋、系杆梁和拱脚结点在纵桥向主要以第三主应力为主(即压应力). 压应力迹线沿拱肋向拱脚结点传递, 应力值逐渐减小. 拱肋轴力的垂直分力由支座反力平衡, 因此支座反力的主应力迹线指向拱肋端部并与拱肋主应力迹线相接, 形成从拱肋至支座的主压应力迹线流. 拱肋轴力的水平分力由系杆预应力平衡. 由于系杆梁预应力大于拱肋轴力的水平分力, 因此拱脚处的系杆梁处于受压状态, 系杆梁中的主应力迹线也为第三主应力(压应力). 预应力锚固点成为主应力迹线相交的地方, 其中 1 号预应力索(弯起致结点的斜面上锚固)和靠近支座处的预应力索锚固处主应力迹线相交的现象较为明显.

2.4 纵桥向截面应力

对纵桥向截面主要研究沿纵桥(x)向和竖向(y)的正应力, 应力的分布通过应力云图和应力等值面图来表示(图 6).

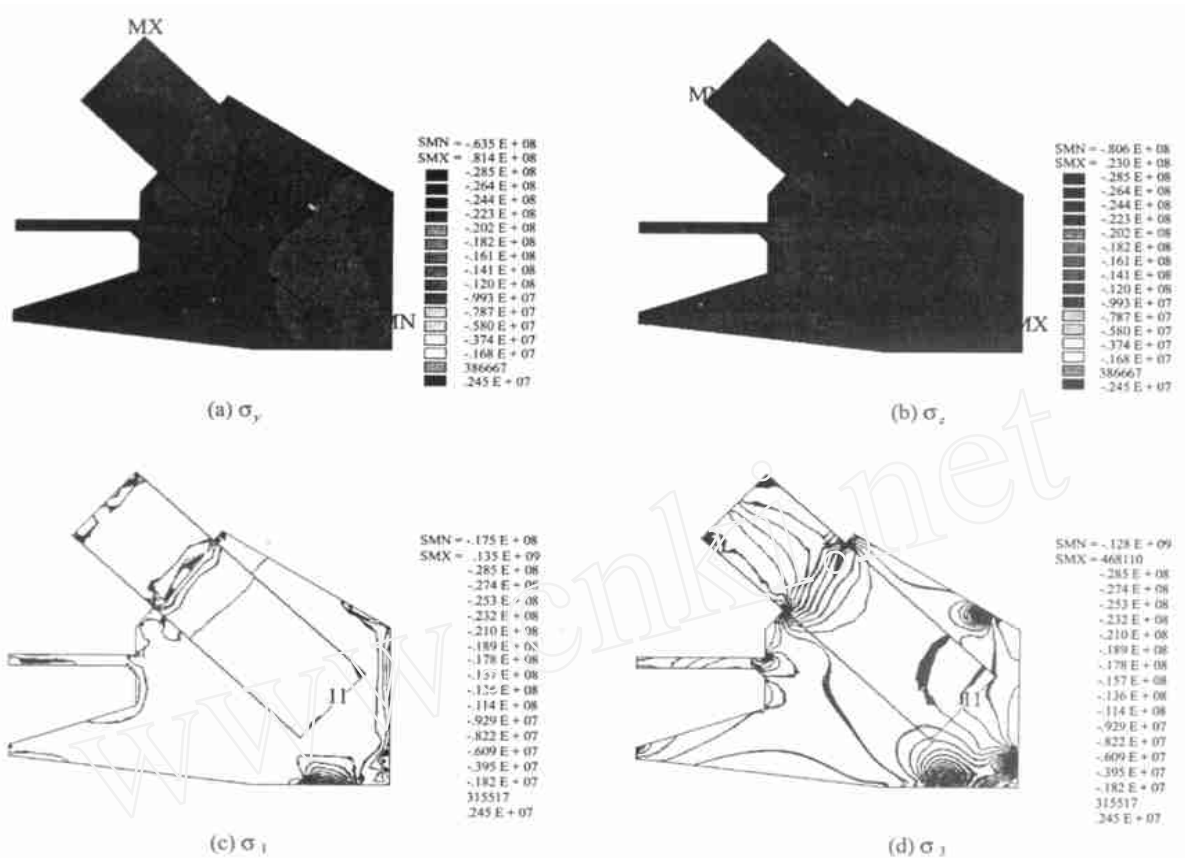


图 6 应力云图和等值面图

Fig. 6 Distribution and isosurface of stress

由图 6 中可见, 在集中力作用点周围(如预应力、精轧螺纹钢锚点下, 支座处及拱肋与结点交接的地方)等值线密集外, 其余区域, 应力较小, 等值线稀疏. 纵桥向截面, σ_z (纵桥向应力)的数值大于 σ_y (竖直方向)的数值, 因此 σ_z 是主要应力, σ_y 是次要应力.

σ_z 在结点内部应力分布较均匀, 而在预应力锚点下有应力集中现象. 大部分区域 σ_z 均小于 7.87 MPa, 而且多数都只有 1~4 MPa. σ_z 沿横桥向的分布规律是: 越靠近拱肋中心线, 应力越大. 在拱脚结点处的系杆梁顶板比底板薄弱, 因此顶板的 σ_z 应力大于底板的应力, 压应力在 -6.98~ -17.8 MPa.

纵桥向截面 σ_y 分布不均匀, 越接近支座、拱肋与结点相交处, σ_y 较大, 但经过一段区域的扩散后逐渐减小. σ_y 沿横桥向的分布规律同 σ_z , 也是越靠近拱肋中心线, 应力越大. 从以上分析可见, 除应力集中区域外, 应力满足设计要求.

3 光弹试验分析

3.1 模型及加载

光弹模型的几何比例为 1/60, 按照结构设计图制作, 包括所有的倒角. 光弹试验模型见图 7.

3.2 应力测试结果

各工况的等色线基本分布规律一致(图 8), 表明各工况应力分布规律基本一致, 主要处于受压状态, 拱脚结点结构总体受力合理. 在预应力锚下, 支座处以及拱肋与节点相交处, 等色线密集, 有应力集中现象, 而节点内部等色线稀疏, 应力较小. 光弹试验的主应力迹线(图 9)与有限元模型计算的主应力迹线规律一致.

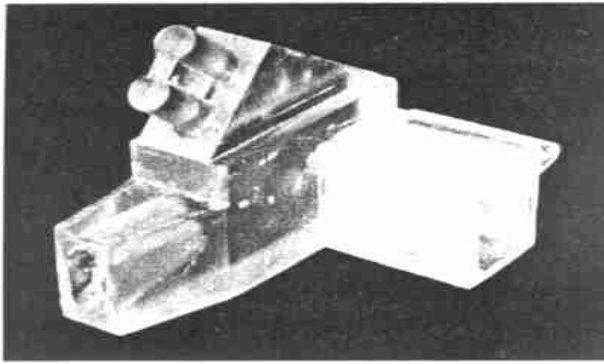


图 7 光弹试验模型

Fig. 7 Model for photo - elastic experiment

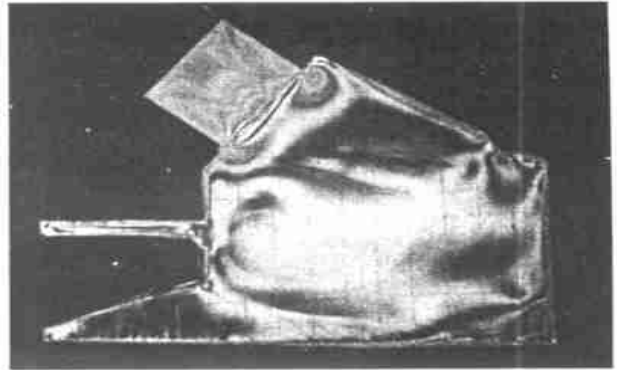


图 8 等色线图

Fig. 8 Isochromatic line

试验测得的应力分布如图 10 所示, 拉应力为正, 压应力为负. 锚块受力点均出现应力集中现象, 数值达 - 7 ~ - 9 MPa. 固结点中部大部份区域应力比较小, 小于 4 MPa. 系杆梁顶板压应力比较大, 尤其是与固结点连接的顶板上部部位, 压应力达 - 9.6 MPa. 顶板下部部位由于合理的倒角结构, 压应力降至 - 5.7 MPa. 在拱肋最大轴力工况下, 固结区大部区域承受压应力, 固结区靠近系杆梁的区域有局部受拉, 数值比较小, 最大为 1.5 MPa. 拱肋最大轴力作用在固结区表面, 因挤压产生局部拉应力比较大, 数值达 2.8 ~ 3.9 MPa.

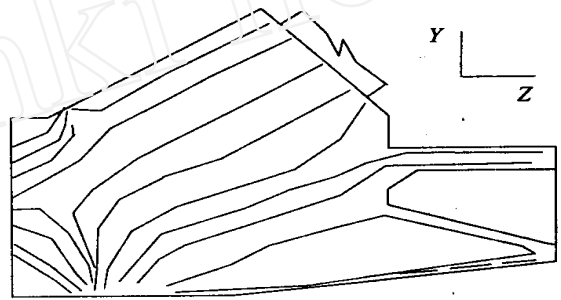


图 9 主应力迹线

Fig. 9 Principal stress trace

基本为压应力, 只有个别点为拉应力, 但数值较小. 在预应力锚点下, σ_x 应力较大, 达 5.1 MPa, 其在结点内部应力分布较均匀, 数值不大. 纵桥向截面 σ_y 分布不均匀, 越接近支座、拱肋与结点相交处, σ_y 较大, 但经过一段区域的扩散后逐渐减小.

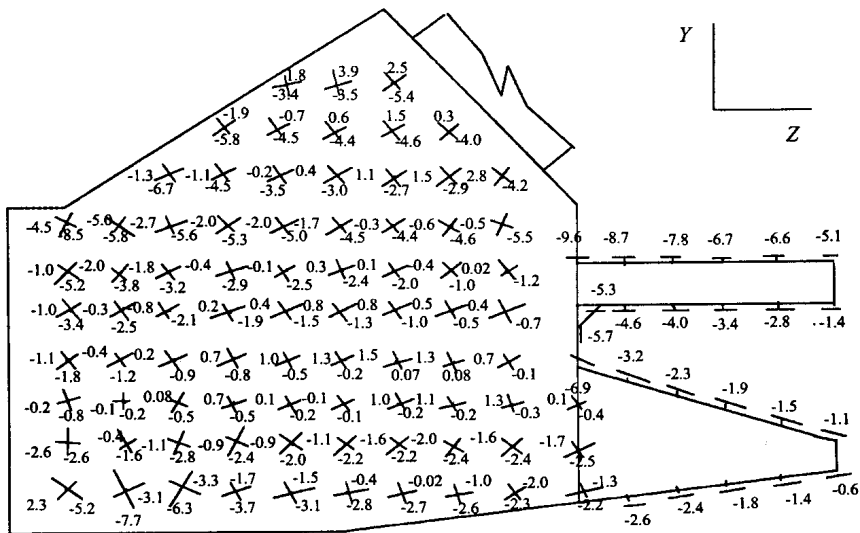


图 10 主应力 (MPa)

Fig. 10 Principal stress(MPa)

4 光弹试验与有限元计算结果比较

光弹实验与有限元计算各有各的优点和缺点,光弹试验结果应与有限元计算结果进行综合分析,供工程设计参考。光弹试验与有限元计算结果地对比分析表明:光弹试验与有限元计算结果应力分布规律一致,应力数值量级相符,从而相互证明了各自结果的正确性;脚结点以受压为主。锚点、支座、拱肋与拱脚结点交接处及刚度突变处应力集中明显,结点中部区域应力均匀且应力较小;因此,从整体上来说,结构的受力是合理的;纵桥向应力是主要应力,光弹试验主应力迹线和有限元计算主应力迹线规律一致,主应力数值量级相符;精轧螺纹钢预应力较小,对结构受力基本没什么影响,可以取消;吊杆对系杆梁的竖向约束对拱脚节点的受力影响不大,可以忽略。

参考文献:

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京:人民交通出版社,1999.
- [2] 顾安邦,孙国柱. 公路桥涵设计手册——拱桥[M]. 北京:人民交通出版社,2000
- [3] 汤国栋,廖光明,谢玲玲,等. 拱式桥梁的新进展[A]. 四川省公路学会桥梁学术研讨会[C]. 成都:西南交通大学出版社. 1996. 370 - 380.
- [4] 郑振飞,徐艳,陈宝春. 深圳北站大桥拱墩固结点局部应力[J]. 中国公路学报,2000(2): 67 - 72.
- [5] 金成棣. 预应力梁拱组式桥梁设计研究与实践[M]. 北京:人民交通出版社,2001.
- [6] JTJ 023 - 85,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

2003 年我校科技工作取得重大进展

1)在科研立项方面,共获各级科技项目 507 项,项目资助经费 3575.2 万元,项目数和项目资助经费分别比 2002 年增长 38%和 15%。特别是国家自然科学基金获批项目 27 项,国家社会科学基金获批 2 项,获批国家自然科学基金项目数是 2002 年的 3 倍多。

2)在成果获奖方面,共获省部级以上成果奖 32 项,其中获国家科技进步二等奖 1 项,福建省科学技术重大贡献奖 1 项,教育部提名国家科学技术奖(自然科学奖一等奖)1 项,省科学技术一等奖 1 项,省科学技术二等奖 2 项,省科学技术三等奖 4 项;省社科优秀成果一等奖 3 项,二等奖 6 项,三等奖 14 项,获奖成果数比上届增长 53.3%。

3)在科研基地建设方面,“数据采掘与信息共享实验室”获省部共建教育部重点实验室立项建设;“福建省空间信息工程研究中心”、“福建省光催化技术工程研究中心”、“福建省功能材料工程研究中心(筹)”三个省级工程研究中心获省计委正式授牌;“福建省光催化重点实验室”、“福建省微电子集成电路重点实验室”二个省级重点实验室获省科技厅批准成立。

(学报编辑部)