

江垵碾压混凝土重力坝渗流特性分析

朱岳明, 匡 峰, 王 锋

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 运用固定网格的结点虚流量法、非均质成层材料单元、缝面无厚度平面单元等,对江垵碾压混凝土坝渗流场进行了建模与分析研究.在反演出坝体几种主要筑坝材料的渗透系数张量的基础上,再通过对多种典型工况的敏感性反馈计算,进一步研究江垵大坝渗流场的渗流特性和渗流场水头分布规律,进而提出碾压混凝土坝防参与排水渗控方案设计的建议.

关键词 碾压混凝土重力坝; 渗流场; 有限单元法; 非均质成层材料单元; 缝面无厚度平面单元

中图分类号 :TV139.14 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2004)03-0266-06

江垵大坝是目前国内已建成的最高的全断面碾压混凝土重力坝.大坝中部设溢洪道,由 4 个泄洪表孔及 3 个泄洪中孔联合泄洪.地下厂房位于右岸,主要由进水塔、3 条引水隧洞(直径 6 m)、尾水调压室、尾水隧洞、主厂房(长 103.5 m,宽 19 m,高 42 m)、主变洞以及送出电线电缆竖井等洞室组成.坝基岩体主要持力层为二迭系霞组灰岩,岩质坚硬较均一,力学强度高,较新鲜完整,风化不深.岩层走向几乎与河谷正交,倾向下游,倾角 35°~45°,平均 38°.

鉴于大坝渗流场影响因素和防参与排水渗控设施方案的复杂性,笔者受工程业主单位的委托,分别对江垵重力坝两个典型坝段进行多个工况的反分析,确定了坝体主要筑坝材料的渗流参数,并围绕渗控方案设计情况、帷幕防渗效果、排水幕渗控能力、防渗体的开裂与否以及渗流量大小等问题,综合计算分析了大坝渗流场的主要渗流特性、影响因素以及提出某些碾压混凝土坝渗控方案的设计建议.

1 渗流场的求解

1.1 固定网格求解有自由面的渗流问题

根据变分原理,式(1)和式(2)分别为三维达西渗流场问题的求解泛函和有限单元法支配方程^[1].

$$\Pi(h) = \frac{1}{2} \int_{\Omega_1} k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i} \frac{\partial h}{\partial x_j} d\Omega \tag{1}$$

$$K_1 H_1 = Q_1 \tag{2}$$

式中: h ——水头; k_{ij} ——渗透系数张量; K_1, H_1, Q_1 ——渗流实域 Ω_1 的总传导矩阵、未知结点水头列阵和结点等效流量列阵.由于在实际工程中,自由面的位置、逸出面的大小及实际渗流域 Ω_1 的大小事先都未知,需通过式(3)的迭代计算才能求得渗流场的解.

$$KH = Q - Q_2 + \Delta Q \tag{3}$$

$$\Delta Q = K_2 H \tag{4}$$

式中: K, H, Q ——计算域 $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$ (Ω_2 为位于渗流自由面以上的渗流虚域)的总传导矩阵、结点水头列阵和结点等效流量列阵; Q_2 ——渗流虚域的结点等效流量列阵; ΔQ —— Ω_2 虚域中虚单元和过渡单元所贡献的结点虚流量列阵.因 ΔQ 与解 H 有关,是一边界非线性问题,得用固定网格法进行迭代求解,比如文献[1]中的结点虚流量法.

1.2 非均质成层材料单元

就碾压混凝土坝的渗流特点,文献[2]中介绍了对层面、缝面及碾压混凝土本体分别进行刻画的非连续

体混合模型.它是联用裂隙渗流理论和达西渗流理论,分别来描述层面和缝面以及混凝土本体的渗流特性.现有计算程序较少,且解题时规模较大,解一个碾压混凝土重力坝平面渗流问题就需上万个单元和结点.对此,假定坝体碾压混凝土材料是由碾压混凝土本体层、层面、缝面、垫层及常态混凝土层等成层材料所组成,形成非均质成层材料单元,这里非均质成层材料模型在某种算法意义上是统一了等效连续体模型和非连续体混合模型,且继承了连续体模型中解题所需单元数少的优点^[3].

1.3 缝面无厚度平面单元

因碾压混凝土本体的透水能力很小,而缝面(冷缝或裂缝)的透水能力与其水力隙宽的立方成正比,缝面无论在其切向或法向上的透水能力均为相对很大,尤其是在缝面法向上其渗透系数为一相对大值,为了避免单独划分具有一定厚度的薄层单元而增加计算难度,提出了缝面无厚度平面单元,一是在网格剖分时无需对它们进行专门剖分,几乎不增加网格剖分和求解时的计算工作量;二是不会因为对缝面或裂缝渗流行为的处理而给整个渗流场求解带来大的误差;三是能极方便地正确模拟碾压混凝土坝中局部零星散落的裂缝、层面和缝面中的集中渗流现象;四是它的引入,碾压混凝土坝的渗流数值建模问题已得到了基本完整的解决^[4].

2 计算模型与网格剖分

计算域沿坝轴线方向的厚度为相邻两排水孔之间孔距的一半.计算域上下游端的垂直剖面及坝体和坝基中所有廊道的周壁面均为渗流场中的不透水面.坝上下游位于水库水位和河床尾水位以下的表面及坝基排水幕排水孔周壁面为已知水头边界面.位于河床尾水位以上的坝下游区、坝上游面各层排水幕中的排水孔都为可能渗流逸出面.计算域均用空间 8 结点 6 面体等参单元或 6 结点 5 面体等参单元剖分,图 1 和图 2 分别为两个典型坝段渗流场计算域的单元网格的剖分结果(画图时各结点的坝轴线方向的 y 轴坐标值事先放大了 20 倍),网格中的单元和结点数分别为 4 565 6081 和 3 945 5220 个.

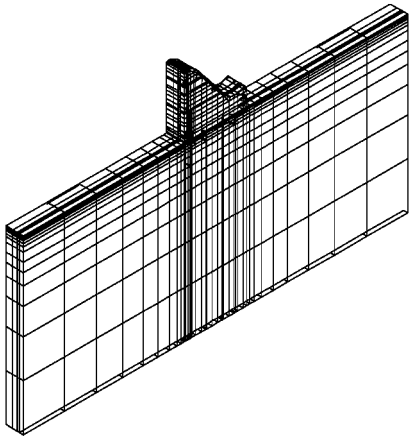


图 1 溢流坝段计算网格

Fig.1 FEM mesh for overflow dam block

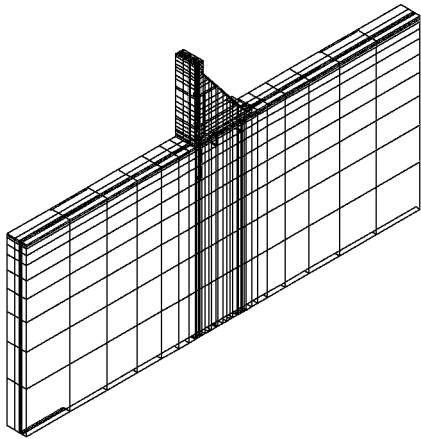


图 2 挡水坝段计算网格

Fig.2 FEM mesh for retaining dam block

3 计算结果分析

3.1 大坝渗流场的反分析

笔者根据观测资料的特点,选取坝上下游水位和渗压计测值相对比较稳定的时段,用稳定渗流场的计算理论和遗传优化算法进行反演计算.首先确定了反分析待定参数上下限可能取值的约束控制条件,进而反演出有关渗流特性参数,并用各渗压计的实测值和反分析所得参数的计算值进行对比,图 3、4 分别为挡水坝段坝建基面和坝体内多个渗压计的布置情况和渗压计水头值的实测和计算值的拟合结果.如图 4 所示,计算值和实测值拟合得较令人满意,特别是各测点水头值的整体变化规律得到了很好的反映.同时部分测点在部分时段内仍然存在一定误差,这也属正常现象,一是说明了大坝实际渗流问题本身的复杂性;二是反映了渗流场反分析理论上目前还存在一定的缺陷.

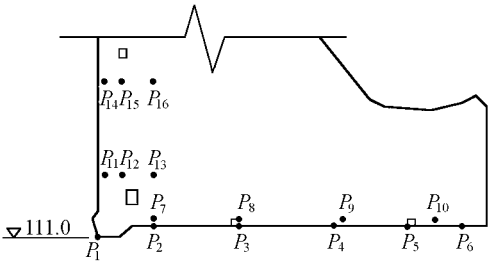


图3 溢流坝段渗压计测点布置情况

Fig.3 Locations of uplift pressure meters in the overflow dam block

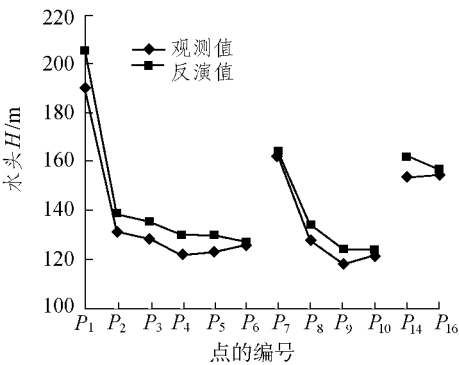


图4 测点观测值与反演值的比较

Fig.4 Comparison of measured data with calculated results at measuring points

3.2 大坝渗流场的渗流特性分析

通过反分析最后确定了特定参数. 根据大坝的渗流特点以及工程运行要求, 在上游水位 236 m, 下游水位 127.28 m 的情况下, 计算了 5 个敏感性反馈工况. 综合分析大坝渗流场的基本特性和影响渗流场性态的主要因素.

工况 1 为溢水坝段在水库正常运行期的计算情况. 坝上游面有 3 至 8 m 厚的二级配碾压混凝土防渗体, 在坝基中的两道排水廊道内有抽排水的纵向排水幕. 图 5 与图 6 为在相邻两排水孔中间剖面上的坝体内等水头线的分布和在 3 个典型高程坝体层缝面上的扬压力水头分布.

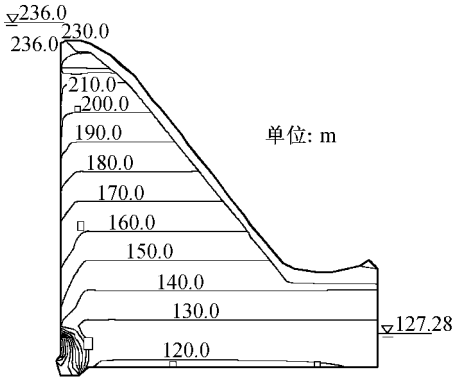


图5 工况 1 相邻排水孔中间剖面坝体等水头线分布

Fig.5 Isolines of hydraulic heads in dam body in the central section between two adjacent drainage holes in case 1

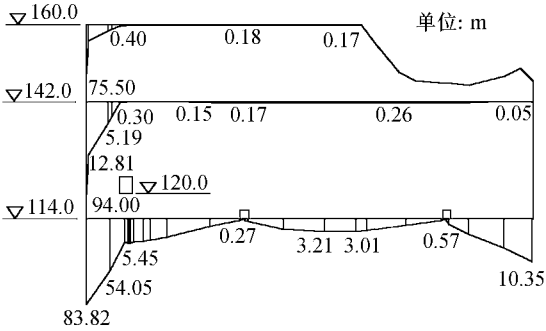


图6 工况 1 相邻排水孔中心剖面扬压力水头分布

Fig.6 Uplift heads in dam body in the central section between two adjacent drainage holes in case 1

由于坝体和坝基中排水幕的强排水降压作用, 尤其是坝体和坝基均为成层材料介质, 三级配碾压混凝土的等水头线几乎都有沿着水平方向延伸至坝下游面防渗体的现象, 且水头值几乎与位置高度相等. 此时层面切向的水力阻力很小, 而垂直层面方向的水力阻力则很大, 同时也说明了坝体层面和缝面上的扬压力极小. 由于坝体中渗流自由面位置很高, 坝中三级配混凝土水平向的水力梯度几乎为零, 所以没有渗透水流从坝下游面渗出. 因为坝上游面变态混凝土较高的抗渗能力以及坝内排水幕的排水截渗作用, 水库水头几乎完全消耗在防渗体内.

工况 2 是在工况 1 的基础上, 假定坝上游面起于高程 145 m 止于高程 219 m 处发生贯穿性的竖向裂缝, 裂缝由上游面深至坝体廊道, 裂缝的水力隙宽均设为 1 mm, 此时渗流场的计算结果如图 7、8 所示. 相对于坝体的弱透水体而言, 上游防渗体的贯穿性开裂对坝体渗流特性的影响是很明显的. 尽管此时由于有排水孔排水幕的强排水降压作用, 水头等值线在排水幕处仍发生了几乎为 90°的折偏, 但等水头线有明显的尾翘现象. 在坝体水平向相对强透水能力的作用下, 裂缝处坝体中的渗透水流部分绕过排水孔渗向下游三级配混凝土区, 极大地增加了坝体层面或缝面上的扬压力.

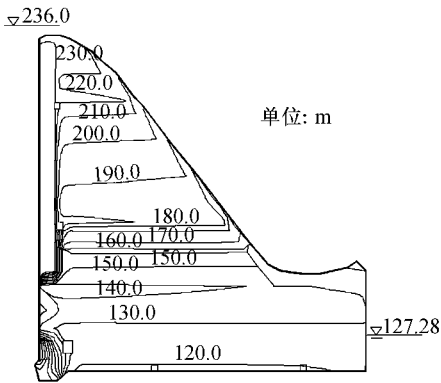


图 7 工况 2 相邻排水孔中间
剖面坝体等水头线分布

Fig.7 Isolines of hydraulic heads in dam body in the central section between two adjacent drainage holes in case 2

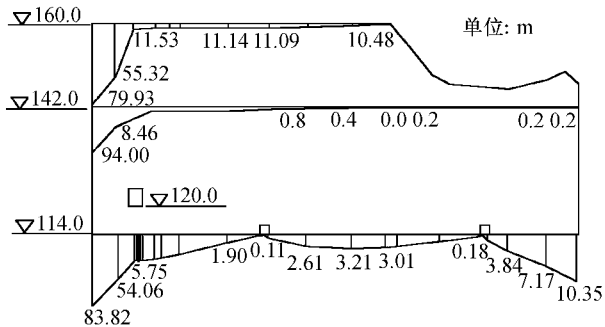


图 8 工况 2 相邻排水孔中心
剖面扬压力水头分布

Fig.8 Uplift heads in dam body in the central section between two adjacent drainage holes in case 2

由于坝建基面常态混凝土垫层以及碾压混凝土本体的透水能力较坝基岩体的透水能力要小得多(小 4 ~ 5 个数量级,甚至更小),很有效地阻断了坝体与坝基之间渗透水流的有效交流,坝体防渗体的开裂以及坝体渗流特性的变化,对坝基岩体中渗流场水头以及坝建基面上扬压力没有影响.因此,坝建基面上扬压力的大小完全取决于坝基岩体的渗流特性以及坝基防参与排水渗控措施的设置情况.

与工况 1 的情况相比较,在工况 3 中坝基两道纵向排水幕完全失效,坝基岩体中仅仅只有防渗帷幕的存在,而在工况 4 中则相反,假定坝基防渗帷幕完全失效,两道排水幕都正常畅通排水工作.此时坝体及坝基渗流场中的等水头线分布结果分别为图 9 和图 10.据图 9 坝基排水幕的失效大大地削弱了坝基防渗帷幕的防渗能力,尽管帷幕完好无损且又有坝踵 4 m 深常态混凝土齿墙的存在,坝基扬压力仍大大地提高了.因坝建基面上常态混凝土垫层的强隔水作用,此时尽管坝建基面上有很大的扬压力水头的顶托作用,坝体碾压混凝土层面和缝面上的扬压力仍很小,基本不随坝基岩体中渗透水头的变化而变化.而在图 10 的工况 4 中,与工况 1 相比较,除坝基防渗帷幕位置处的局部区外,无论是渗流场中的水头分布情况还是坝建基面上扬压力的大小,工况 4 和工况 1 这两种工况的结果甚为一致,因此混凝土坝基的水头分布主要受控于排水幕排水降压的渗控作用.

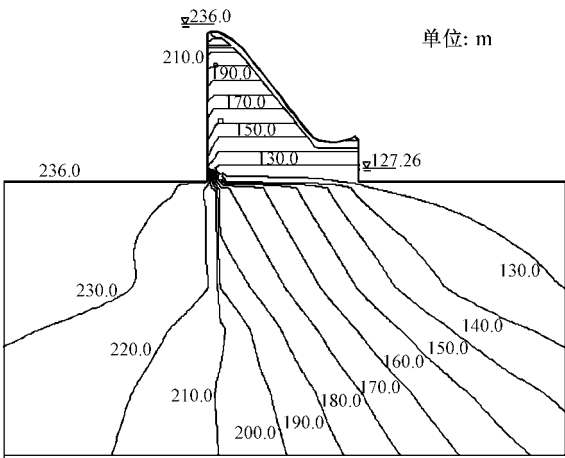


图 9 工况 3 相邻排水孔中间剖面坝体
与坝基等水头线分布

Fig.9 Isolines of hydraulic heads in dam body and dam foundation in the central section between two adjacent drainage holes in case 4

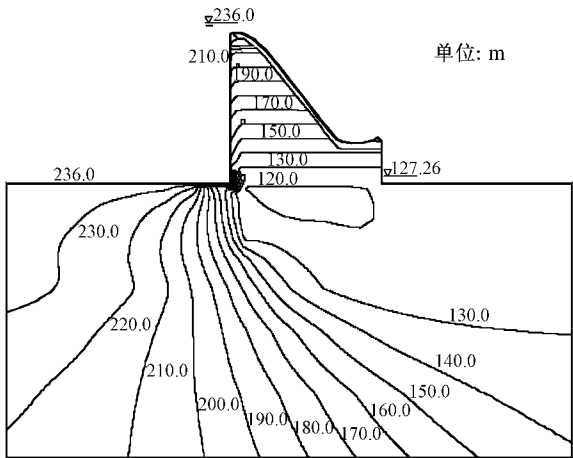


图 10 工况 4 相邻排水孔中心剖面坝体
与坝基等水头线分布

Fig.10 Isolines of hydraulic heads in dam body and dam foundation in the central section between two adjacent drainage holes in case 5

工况5是在工况1的基础上,考虑大坝的廊道抽排水系统完全失效,坝基所有廊道充满了水,都与坝下游河床尾水相连,坝基排水廊道中排水幕的排水高程即为坝下游河床的尾水位127.28 m.图11和图12为该工况的渗流场计算结果.在下游水位高程以上坝体中的渗流特性与工况1中的情况甚为一致,但高程127.28 m以下坝体浸泡在渗流场中,层面和缝面上承受相当大的浮托力,在高程114 m的坝建基面上,在防渗帷幕和主排水幕处的扬压力水头分别达13.24 m和13.56 m,这仍相应地远小于设计允许值67.64 m和40.46 m,排水幕起到了控制扬压力的主导作用.

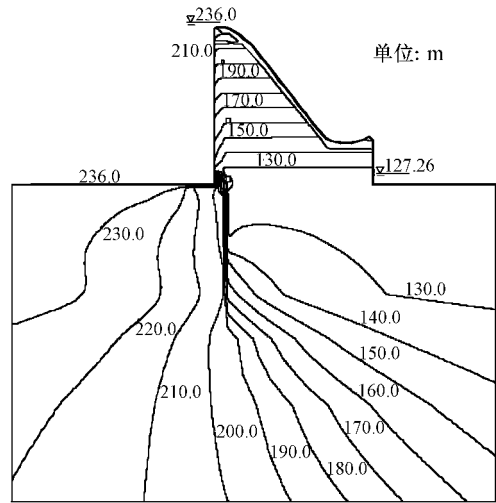


图 11 工况 5 相邻排水孔中心剖面坝体与坝基等水头线分布

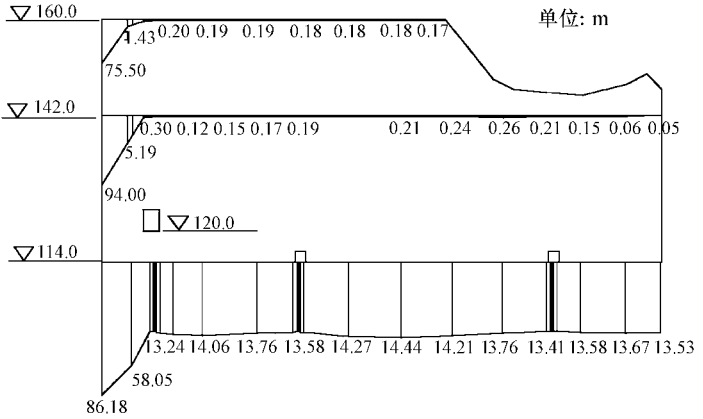


图 12 工况 5 相邻排水孔中心剖面扬压力水头分布

Fig.11 Isolines of hydraulic heads in dam body and dam foundation in the central section between two adjacent drainage holes in case 5

Fig.12 Uplift of heads in dam body in the central section between two adjacent drainage holes in case 5

4 结论与建议

- a. 坝体的渗透各向异性,导致排水幕后渗流场中的水头等值线呈水平向分布,坝下游面内的渗流自由面位置很高,但由于坝中排水幕的存在及层面和缝面中的水力梯度很小(几乎为零),以及坝下游面变态混凝土或常态混凝土的存在,没有渗透水流从坝下游面上逸出.
- b. 坝上游面二级配混凝土的贯穿性开裂明显,会导致坝体局部区层面和缝面扬压力的增加,但是仍然是小于层面和缝面的扬压力设计允许值.坝体开裂对整个工程的影响是个很复杂的问题,在大坝的运行过程中要尽可能避免这种现象的再出现,如有发生要即时做好加固工作.建议在今后新的工程建设中要做好大坝施工前的混凝土温控防裂研究和施工期混凝土温控防裂措施的认真落实,力争坝体完全不裂和不漏.
- c. 坝建基面上的扬压力大小主要取决于坝基岩体的渗流特性、渗控设施以及坝基溢流型排水孔排水幕的排水高程.为了较理想地减小坝建基面上的扬压力,要尽可能地降低排水廊道的底板高程,减小坝建基面上浮托力.
- d. 为了改善坝体的渗流状态,设计和施工时应设法尽可能地提高坝上游面二级配混凝土的抗渗能力,尤其是要设法防止变态混凝土的贯穿性开裂以及进一步降低二级配混凝土防渗体层面切向的渗水能力.

参考文献:

[1]朱岳明,陈振雷,陈晴,等.改进排水子结构法求解地下厂房洞室群区的复杂渗流场[J].水利学报,1996(9):79—85.
[2]朱岳明,张燎军,周建平,等.龙滩高碾压混凝土重力坝的渗控设计方案研究[J].水利学报,1997,(3):1—8.
[3]朱岳明,张贵寿,徐惠民.长江三峡碾压混凝土坝方案厂房坝段渗控方案研究[J].河海大学学报(自然科学版),2000,28(2):1—6.

[4]朱岳明,龚道勇,章洪,等. 碾压混凝土坝渗流场分析的缝面渗流平面单元模拟法[J].水利学报,2003(3):63—68.

Analysis of seepage characteristics of
Jiangya roller compacted concrete gravity dam

ZHU Yue-ming , KUANG Feng , WANG Feng

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai Univ. , Nanjing 210098 , China)

Abstract : By use of the node virtual discharge method and introduction of inhomogeneous stratified material elements and planar non-thickness elements , a numerical model is established for analysis of the seepage field of the Jiangya roller compacted concrete gravity dam. Based on the back-analysis of the tensor of permeability coefficients of several main materials of the dam and respective sensitive feedback calculations under several typical operation conditions , a study is made on the seepage characteristics about the distribution of the hydraulic heads and uplifts in the dam body and foundation , so as to verify the reasonability and effectiveness of the seepage control scheme.

Key words : roller compacted concrete gravity dam ; seepage field ; finite element method ; inhomogeneous stratified material element ; planar non-thickness element

· 简讯 ·

钱正英院士参加河海大学举办的“ 中国水问题 ”专题座谈会

2004 年 5 月 15 日下午 ,钱正英院士来到河海江宁新校区参加“ 中国水问题 ”专题座谈会。在江宁校区会议中心 ,钱院士与 30 多名教授、博导们一起 ,就中国水问题进行了座谈。座谈会由张长宽校长主持 ,水资源环境学院崔广柏教授就《水利工作新理念的探索》、水资源环境学院芮孝芳教授就《水利工作者应加强对“ 水 ”特性的认识和研究》、东部资源环境与持续发展研究中心郑垂勇教授就《关于建立中国农村水利补偿基金的建议》、科学研究院夏自强、彭世彰教授分别就《农业节水研究新思考》、《实践人与自然和谐共处的新理念的几点思考》、公共管理学院余文学副教授就《关于蓄滞洪区建设与管理的思考》、水利水电工程学院王玲玲副教授就《将人与自然和谐共处的理念应用于教学工作中》分别做了重点发言。钱院士在座谈会的最后 ,谈到了三点问题。首先 ,她回忆了近年来自己思想发展的心路历程 :在逐渐构思科技工作新理念的过程中 ,她感到了“ 人与自然和谐共处 ”在水利工作中的重要指导意义 ,并很高兴能够在河海大学做这个学术报告 ,与师生们共同交流 ,更好地梳理过去的认识 ,进一步提升理念。接下来 ,钱院士谈到了关于“ 与人为本 ”和“ 人与自然和谐共处 ”的关系问题。她说 ,这两者不能对立 ,而应该是相互统一的 ,两者的落脚点都是寻求人类的可持续发展。最后钱院士谈到了对河海发展的希望 ,她提出 :学科设置中要充分考虑生态和环境问题 ;在教材内容中要进一步做出调整 ,学校要追踪国内外实践 ,这是在贯彻科学发展观方面领先的关键。张校长代表与会人员向钱院士的讲话表示感谢 ,并表示接下来将专门组织研讨 ,在学科建设、教材修改和人才培养上做工作 ,以更好地贯彻钱院士的理念与相关指示精神。

(本刊编辑部 供稿)